

**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU**

**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I  
INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA**

**Sveučilišni diplomski studij**

**SIMULACIJA RADA DISTRIBUTIVNE MREŽE S  
VISOKIM UDJELOM OIE U STVARNOM VREMENU**

**Diplomski rad**

**Matej Anđelić**

**Osijek, 2019.**

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA  
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**Obrazac D1: Obrazac za imenovanje Povjerenstva za obranu diplomskog rada****Osijek, 08.07.2019.****Odboru za završne i diplomske ispite****Imenovanje Povjerenstva za obranu diplomskog rada**

<b>Ime i prezime studenta:</b>	Matej Anđelić
<b>Studij, smjer:</b>	Diplomski sveučilišni studij Elektrotehnika
<b>Mat. br. studenta, godina upisa:</b>	D-1108, 22.09.2018.
<b>OIB studenta:</b>	00374187267
<b>Mentor:</b>	Prof.dr.sc. Damir Šljivac
<b>Sumentor:</b>	Matej Žnidarec
<b>Sumentor iz tvrtke:</b>	
<b>Predsjednik Povjerenstva:</b>	Izv. prof. dr.sc. Zvonimir Klaić
<b>Član Povjerenstva:</b>	Izv. prof. dr. sc. Predrag Marić
<b>Naslov diplomskog rada:</b>	Simulacija rada distributivne mreže s visokim udjelom OIE u stvarnom vremenu
<b>Znanstvena grana rada:</b>	<b>Elektroenergetika (zn. polje elektrotehnika)</b>
<b>Zadatak diplomskog rada:</b>	U teorijskom dijelu opisati tehničke uvjete priključenja i rada distribuiranih izvora na OIE u distributivnoj mreži. U praktičnom dijelu u simulatoru Typhoon HIL na modelu distributivne mreže s rastućom razine integracije OIE izvršiti proračun strujno-naponskih prilika u stvarnom vremenu uz primjenu konvencionalnih i naprednih metoda. Sumentor: Matej Žnidarec, mag.ing. Tema je otvorena za prijavu svim studentima smjera DEB. Kriterij dodjele: prosjek ocjena + ocjena iz kolegija OIE + Integracija OIE i NM.
<b>Prijedlog ocjene pismenog dijela ispita (diplomskog rada):</b>	Izvrstan (5)
<b>Kratko obrazloženje ocjene prema Kriterijima za ocjenjivanje završnih i diplomskih radova:</b>	Primjena znanja stečenih na fakultetu: 2 bod/boda Postignuti rezultati u odnosu na složenost zadatka: 3 bod/boda Jasnoća pismenog izražavanja: 3 bod/boda Razina samostalnosti: 2 razina
<b>Datum prijedloga ocjene mentora:</b>	08.07.2019.
Potpis mentora za predaju konačne verzije rada u Studentsku službu pri završetku studija:	Potpis:
	Datum:

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA  
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA **OSIJEK****IZJAVA O ORIGINALNOSTI RADA**

Osijek, 23.07.2019.

**Ime i prezime studenta:**

Matej Anđelić

**Studij:**

Diplomski sveučilišni studij Elektrotehnika

**Mat. br. studenta, godina upisa:**

D-1108, 22.09.2018.

**Ephorus podudaranje [%]:**

16%

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Simulacija rada distributivne mreže s visokim udjelom OIE u stvarnom vremenu**

izrađen pod vodstvom mentora Prof.dr.sc. Damir Šljivac

i sumentora Matej Žnidarec

moj vlastiti rad i prema mom najboljem znanju ne sadrži prethodno objavljene ili neobjavljene pisane materijale drugih osoba, osim onih koji su izričito priznati navođenjem literature i drugih izvora informacija. Izjavljujem da je intelektualni sadržaj navedenog rada proizvod mog vlastitog rada, osim u onom dijelu za koji mi je bila potrebna pomoć mentora, sumentora i drugih osoba, a što je izričito navedeno u radu.

Potpis studenta:

# Sadržaj

1. UVOD .....	6
1.1. Zadatak diplomskog rada.....	7
2. DISTRIBUIRANA PROIZVODNJA ELEKTRIČNE ENERGIJE.....	8
2.1. Prednosti i nedostaci distribuiranih izvora .....	9
2.2. Utjecaj integracije distribuirane proizvodnje na distributivnu mrežu .....	10
2.3. Utjecaj distribuirane proizvodnje na elektroenergetske prilike u mreži.....	12
3. FOTONAPONSKI SUSTAVI.....	16
3.1. Autonomni fotonaponski sustavi .....	16
3.2. Mrežni fotonaponski sustavi.....	17
3.3. Hibridni fotonaponski sustavi.....	18
4. KUPCI S VLASTITOM PROIZVODNJOM .....	20
4.1. Obiteljska kuća kao kupac s vlastitom proizvodnjom .....	20
4.2. Tvrtka kao kupac s vlastitom proizvodnjom .....	22
4.3. Koncept izvođača radova kao kupac s vlastitom proizvodnjom .....	23
4.4. Komercijalne zgrade kao kupac s vlastitom proizvodnjom.....	24
4.5. Opterećenje koje se može kontrolirati kao kupac s vlastitom proizvodnjom.....	26
4.6. Zgrada gdje investitor prodaje električnu energiju stanarima kao kupac s vlastitom proizvodnjom.....	27
4.7. Zajednička pohrana kao kupac s vlastitom proizvodnjom .....	28
4.8. Virtualna elektrana kao kupac s vlastitom proizvodnjom .....	30
4.9. Zakon o obnovljivim izvorima za kupce s vlastitom proizvodnjom .....	32
5. EKSPERIMENTALNO ODREĐIVANJE STRUJNO-NAPONSKIH PRILIKA U STVARNOM VREMENU.....	36
5.1. Referentni slučaj .....	40
5.2. Distributivna mreža – 1. slučaj .....	47
5.2.1. Sunčani dan .....	49
5.2.2. Promjenjivi dan .....	55
5.3. Distributivna mreža – 2. slučaj .....	61
5.3.1. Sunčani dan .....	63
5.3.2. Promjenjivi dan .....	68
6. ZAKLJUČAK .....	75
POPIS LITERATURE .....	78
Sažetak .....	80

Abstract .....	80
ŽIVOTOPIS .....	81

## 1. UVOD

U ovom radu, u drugom poglavlju, definirati će se distribuirana proizvodnja električne energije, njezine karakteristike, razlozi sve veće uporabe te prednosti i nedostaci u korištenju. Navesti će se smjernice za energetske i klimatski paket Europske unije za 2020. i 2030. godinu te dugoročna strategija Europske unije za 2050. godinu.

Zatim će biti govora o utjecaju integracije distribuirane proizvodnje na distributivnu mrežu gdje će se dati definicija aktivne i pasivne mreže te izgled elektroenergetskog sustava prije i nakon integracija distribuiranih izvora. Također, bit će predstavljen utjecaj distribuirane proizvodnje na elektroenergetske prilike u mreži.

U trećem poglavlju rada definirati će se fotonaponski sustavi, navesti će se njihova podjela te osnovni dijelovi. Definirati će se autonomni, mrežni i hibridni fotonaponski sustavi te će se navesti njihovi osnovni dijelovi.

U četvrtom poglavlju rada definirati će se kupci s vlastitom proizvodnjom i navesti tehnologije u kombinaciji fotonaponskog sustava i tereta spojenog na distribucijsku mrežu koje se mogu koristiti. Svaka tehnologija je kratko opisana, navedeni su elementi od kojih se sastoji, prednosti i nedostaci te su prikazani slikom.

U petom poglavlju rada odrađena je simulacija u programu DigSILENT. Simulacija se sastoji od tri dijela. Prvi dio predstavlja distributivnu mrežu za referentni slučaj koji će odrediti početna stanja u mreži. Referentni slučaj se sastoji od 20 potrošača koje predstavljaju obiteljske kuće i 10 potrošača koje predstavljaju komercijalne zgrade spojene na mrežu. Na osnovu tih početnih stanja analizirati će se sljedeći dijelovi. Drugi dio predstavlja distribucijsku mrežu prvog slučaja koja se sastoji od 10 kupaca s vlastitom proizvodnjom kao tehnologija obiteljske kuće i 5 kupaca s vlastitom proizvodnjom kao tehnologija komercijalne zgrade spojenih na mrežu, a simulirani su za sunčani i promjenjivi dan. Treći dio predstavlja distribucijsku mrežu drugog slučaja koja se sastoji od 20 kupaca s vlastitom proizvodnjom kao tehnologija obiteljske kuće i 10 kupaca s vlastitom proizvodnjom kao tehnologija komercijalne zgrade spojenih na mrežu, a simulirani su za sunčani i promjenjivi dan. Iz provedenog mjerenja postavljene su tablice za naponske prilike, ukupne gubitke u sustavu, strujna opterećenja te tokove snaga u mreži. Iz tablica su napravljeni dijagrami te navedeni zaključci za svaki od slučaja.

### **1.1. Zadatak diplomskog rada**

Zadatak diplomskog rada je u teorijskom dijelu opisati tehničke uvjete priključenja i rada distribuiranih izvora na obnovljive izvore energije u distributivnoj mreži. Zadatak praktičnog dijela je u simulatoru DigSILENT na modelu distributivne mreže s rastućom razinom integracije obnovljivih izvora energije izvršiti proračun strujno-naponskih prilika u stvarnom vremenu uz primjenu konvencionalnih i naprednih metoda.

## **2. DISTRIBUIRANA PROIZVODNJA ELEKTRIČNE ENERGIJE**

Distribuirana proizvodnja predstavlja elektrane manjih snaga koje se u pravilu priključuju na distributivnu mrežu na srednjenaponskoj razini, dok se najmanji sustavi priključuju na niskonaponskoj razini. [1] Distribuiranu proizvodnju električne energije u pravilu čine fotonaponski sustavi, vjetroelektrane manjih snaga, male hidroelektrane, geotermalne elektrane te mala kogeneracijska postrojenja na biomasu i bioplin. [2]

Distribuirana proizvodnja električne energije postaje jedan od glavnih elementa u stvaranju moderne energetike. Ona svakako zaslužuje najviše pozornosti u planiranju jer se odnosi najprije na pouzdanost opskrbe, efikasnost sustava te u konačnici na zaštitu okoliša. Negativno djelovanje prekomjernih emisija CO<sub>2</sub> koje ponajprije dolaze iz konvencionalnih izvora električne energije postaje prekretnica koja određuje smjer razvoja energetike u 21. stoljeću.

Energetski i klimatski paket Europske unije za 2020. godinu govori da se u odnosu na 1990. godinu mora smanjiti emisija CO<sub>2</sub> za 20%, povećati udio obnovljivih izvora u ukupnoj potrošnji primarne energije za 20% te povećati energetska učinkovitost za 20%. Energetski i klimatski okvir Europske unije za 2030. godinu govori da se u odnosu na 1990. godinu mora smanjiti emisija CO<sub>2</sub> za najmanje 40%, udio od minimalno 32% obnovljivih izvora energije u finalnoj potrošnji energije te povećati energetska učinkovitost od minimalno 32,5%. Dugoročna strategija Europske unije za 2050. godinu je da Europska komisija želi klimatski neutralnu Europu. Njihov cilj je biti u skladu s Pariškim sporazumom o zadržavanju povećanja globalne temperature ispod 2°C, a s ciljem da se održi i ispod 1,5°C. S tim ciljevima je postavljen put kojim energetika treba ići, a to je uvođenje distribuiranih izvora koji su prijateljski nastrojeni prema okolišu.

U svijetu se uglavnom većina električne energije od ukupne proizvodnje, proizvodi na bazi korištenja fosilnih goriva. Vodeći izvori onečišćenja ugljikovim dioksidom su upravo konvencionalne elektrane na fosilna goriva. Kako bi se poštovali zadani kriteriji, počelo se s uvođenjem efikasnijih distribuiranih sustava i distribuiranom proizvodnjom energije. Razlog toga su postavljanje fotonaponskih panela i vjetroturbina za proizvodnju električne energije iz obnovljivih izvora, kogeneracija na biomasu i bioplin, mikrokogeneracija, dizalica topline i hibridni sustavi, koji znatno povećavaju efikasnost pretvorbe, a također koriste obnovljive izvore energije. [3]



Proizvodnja električne energije iz distribuiranih izvora nije predvidiva, odnosno jako je promjenjiva što nije u skladu s potrebama potrošnje, ali zbog ekoloških kriterija imaju prednost u odnosu na temeljne tj. konvencionalne elektrane. Na taj način zbog nerentabilnog poslovanja centralnih elektrana dolazi do većih posljedica jer dovodi u pitanje i sigurnost temeljne opskrbe. Sljedeći problem je da dolazi do zagušenja mreže zbog prekomjerne proizvodnje električne energije iz distribuiranih izvora, u uvjetima niske potrošnje. Ovdje je potrebno dati do znanja da problem nisu mali distribuirani sustavi, već oni veliki, poput vjetroparkova ili solarnih parkova. Do toga dolazi jer elektroenergetska mreža ne može uvijek preuzeti od njih svu proizvedenu električnu energiju u slučaju velike količine vjetra ili Sunčevog zračenja. [4]

Prema današnjem razvojnem stanju, proizvodnja električne energije iz distribuiranih izvora obilježena je sljedećim karakteristikama:

- postupak planiranja distribuiranih izvora nije centraliziran,
- raspored proizvodnje distribuiranih izvora nije centraliziran,
- distribuirani izvori najčešće su priključeni na distributivnu mrežu,
- veličina izgradnje distribuiranih izvora manja je od 50-100 MW.

S obzirom da izostaje centraliziranost planiranja i rasporeda proizvodnje, dolazi do nemogućnosti dispečerskog upravljanja iz nacionalnog dispečerskog centra unutar elektroenergetskog sustava. Karakteristike elektroenergetskog sustava su da uvrsti neku distribuiranu proizvodnju u raspored proizvodnje. Na taj način može se utjecati na dvije temeljne komponente elektroenergetskog sustava, a to su frekvencija koja je globalni pokazatelj te napon koji je lokalni pokazatelj. Procjena kvalitete električne energije koja je isporučena vrši se pomoću navedenih pokazatelja. Na distribuirane izvore gleda se isključivo kao na proizvođače električne energije proizvedene u kWh, oni nemaju utjecaj na funkcije elektroenergetskog sustava kao što su regulacija napona, regulacija jalove snage, pouzdanost mreže, snaga pričuve itd. [5]

## **2.1. Prednosti i nedostaci distribuiranih izvora**

Prednosti distribuiranih izvora su sljedeći: [5]

- jednostavnije je pronaći lokacije za manje izvore,

- tehnološkim razvojem povećava se raspoloživa veličina izgradnje od 100kW do 150MW,
- subvencije,
- smanjenje CO<sub>2</sub>,
- niski troškovi održavanja,
- financijske institucije ulaze u projekte izgradnje distribucijskih izvora zbog dobre zarade,
- poduzetnicima se na tržištu otvara prilika u pokretanju proizvodnje električne energije,
- zahtjevi kupaca električne energije za kupnjom iste iz obnovljivih izvora se svakim danom povećavaju,
- distribuirani izvori su smješteni u blizini potrošnje, na taj se način smanjuju gubici u prijenosu,
- kod kogeneracijskih postrojenja moguća je opskrba potrošača toplinskom energijom,
- velika učinkovitost kogeneracijskih postrojenja,
- prirodni plin se koristi kao najčešće gorivo distribuiranih izvora, smatra da je on stalno raspoloživ i stabilne cijene,
- plinske jedinice imaju niske kapitalne troškove u odnosu na velike proizvodne jedinice.

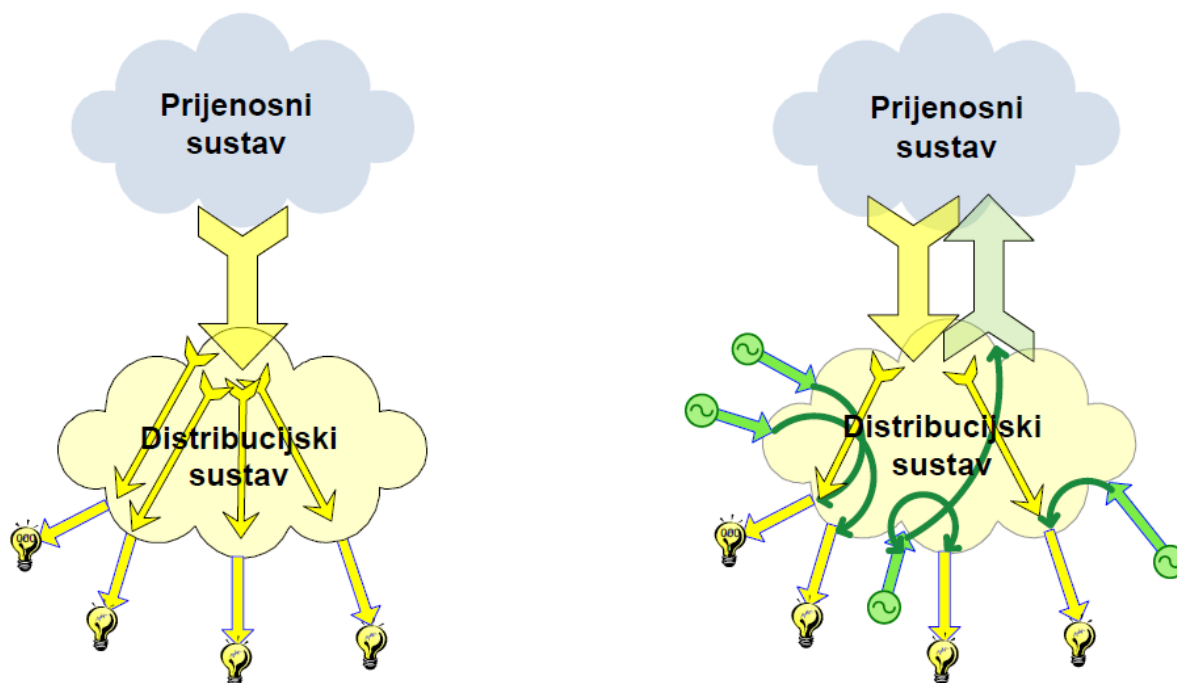
Nedostaci distributivnih izvora su sljedeći: [6]

- veliki kapitalni troškovi po jedinici instalirane snage,
- distribucijska mreža nije inicijalno građena za prihvatanje proizvodnih objekata,
- traženje posebnih uvjeta za lokaciju ugradnje, posebice se to odnosi na OIE,
- proizvodnja nije predvidiva i posljedično su veći troškovi uravnoteženja sustava,
- potrebna je rezerva iz konvencionalnih elektrana.

## **2.2. Utjecaj integracije distribuirane proizvodnje na distributivnu mrežu**

Pojavom obnovljivih izvora energije i njihovim sve većim priključivanjem na elektroenergetski sustav dolazi do promjena u sustavu koji je hijerarhijski organiziran. Prije distribuirane proizvodnje uloga distribuirane mreže je bila da transformira i prenese električnu energiju preuzetu iz prijenosne mreže do krajnjih kupaca. Prema tome tok snage je bio jednosmjernan, odnosno snaga se prenosila od viših prema nižim naponskim razinama. Mreža

je tada bila pasivna. Spajanjem obnovljivih izvora na distributivnu mrežu mijenja se i klasična konfiguracija, odnosno shvaćanje, upravljanje, podjela uloga i djelovanje distributivne mreže te ona više nije pasivna već postaje aktivna kao što je prikazano na slici 2.1.



**Slika 2.1.** Elektroenergetski sustav prije i nakon integracije distribuiranih izvora [7]

U samim počecima priključivanja distribuiranih izvora na mrežu njihov je broj bio zanemariv, dok je danas njihov broj puno veći. U budućnosti se očekuje da taj broj raste te tada njihov utjecaj postaje jako značajan. Distribuirana proizvodnja iz obnovljivih izvora u velikoj mjeri ovisi o svojstvima i karakteristikama obnovljivih izvora. Karakteristike obnovljivih izvora su takve da ovisi o vremenskim uvjetima te je kod njih mogućnost upravljanja izostavljena. S obzirom da energija proizvedena iz obnovljivih izvora ima prioritet predaje u mrežu, to uvelike utječe na stabilnost, fleksibilnost i vođenje sustava te pouzdanost opskrbe kupaca. S obzirom na poticaje koji se daju proizvođačima električne energije iz obnovljivih izvora, dodatno se potiče proizvodnja iz obnovljivih izvora, a u mrežu se predaje maksimalna instalirana snaga priključenih obnovljivih izvora. U budućnosti se može očekivati još više priključenih obnovljivih izvora na distributivnu mrežu te će to dodatno komplicirati i otežavati stanje u mreži. [8]

### 2.3. Utjecaj distribuirane proizvodnje na elektroenergetske prilike u mreži

Priključivanje distribuiranog generatora na mrežu obično dovodi do povećanja napona na mjestu priključka, također može dovesti do povećanja napona kod obližnjih potrošača. To povećanje napona može prijeći granice dopuštenoga te zbog toga postoji potreba za ograničenjem veličine generatora koji može biti spojen na distributivnu mrežu. Kod distribuirane proizvodnje iz obnovljivih izvora najvažnije je interpretirati lokalni utjecaj dodane snage u mrežu na porast napona na mjestu priključka. Generator mora biti dimenzioniran tako da njegova instalirana snaga u vrijeme rada punom snagom, a za vrijeme najmanje potrošnje električne energije na mjestu priključka te u njegovoj blizini ne podiže napon više od granice dopuštenoga. Dopusćeni porast napona ovisi o tome kako mreža trenutno radi, odnosno koliko je trenutni napon blizu maksimalno dopuštenom naponu koji iznosi  $U_n + 10\%$ . [2]

Jednom dijelu potrošača pored djelatne snage koju troši potrebna je i jalova snaga. Jalovu snagu netko mora proizvesti, a elektroenergetski sustav prenijeti do krajnjeg potrošača. U slučaju manjka jalove snage doći će do pada napona. Prema tome, regulacija jalovih snaga i regulacija napona zajedno su istog značaja kao i održavanje ravnoteže djelatnih snaga u mreži. Kako bi se postigla ravnoteža unutar sustava s ciljem održavanja napona prema pravilima, izvršavaju se analize električnih prilika u mreži kao što su proračuni tokova snaga. Svaki proračun tokova snaga i napona traži definiranje uvjeta sabirnica. Svaka sabirnica vezana je uz četiri veličine, a to su djelatna i jalova snaga, modul napona i fazni kut napona. Od tih veličina minimalno dvije moraju biti poznate u jednadžbama, zatim se prema poznatim veličinama klasificira vrsta čvora. Postoje tri vrste čvorova, a to su: referentni čvor, čvor s opterećenjem i generatorski čvor.

Referentni čvor odgovara sabirnicama snažne elektrane ili sabirnicama gdje se nadovezuje kruta mreža. U ovom čvoru zadani su modul napona  $V_i$  i fazni kut napona  $\delta_i$ , potrebno je odrediti djelatnu snagu  $P_{Gi}$  i jalovu snagu  $Q_{Gi}$ . Za regulacijsku elektranu mora biti definirana rezerva snage kako bi bili pokriveni gubici djelatne i jalove snage koji u početku nisu poznati. Njihova vrijednost dobije se na kraju proračuna.

Kod čvora s opterećenjem ne postoje izvori, prema tome  $P_{Gi} = 0$  i  $Q_{Gi} = 0$ . Poznate su vrijednosti radne i jalove snage ( $P_{Li}$ ,  $Q_{Li}$ ) te se računa iznos napona  $V_i$  i fazni kut napona  $\delta_i$ .

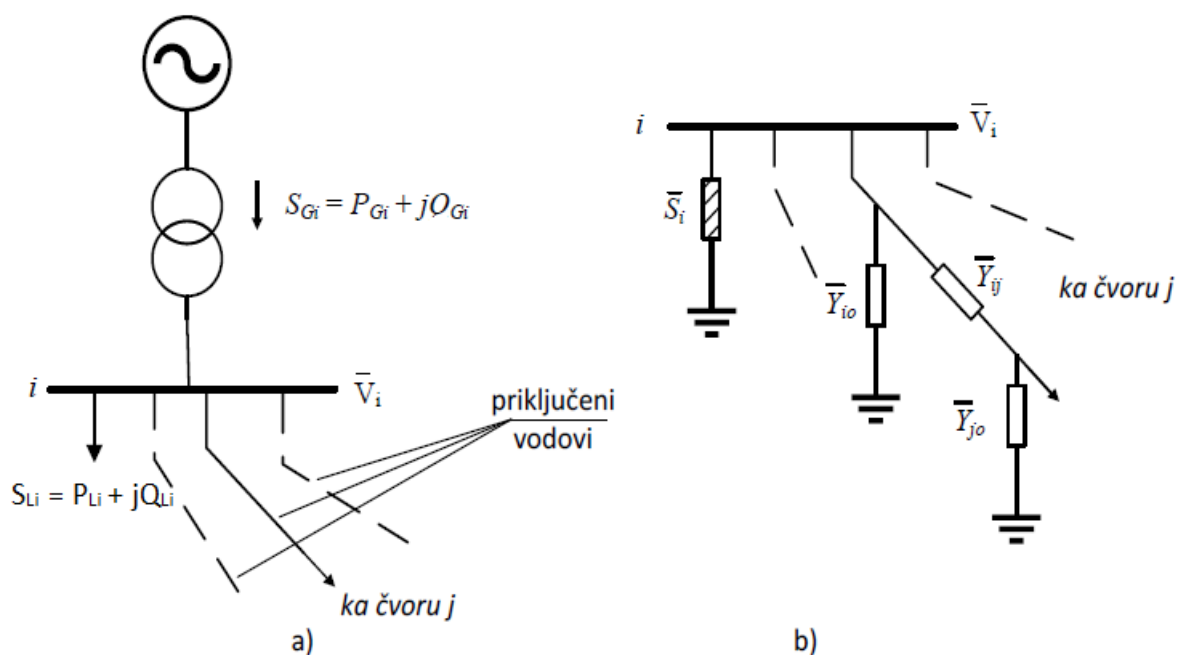
U generatorskom čvoru unaprijed je određena djelatna snaga  $P_{Gi}$  i modul napona  $V_i$ . Potrebno je odrediti fazni kut napona  $\delta_i$  i jalovu snagu generatora  $Q_{Gi}$ . [9]

**Tablica 2.1. Klasifikacija čvorova**

Vrsta čvora	Tip	Zadane veličine	Nepoznate veličine
Referentni čvor	REF	$V_i, \delta_i, P_{Li}, Q_{Li}$	$P_{Gi}, Q_{Gi}$
Čvor s opterećenjem	P - Q	$P_{Gi} = 0, Q_{Gi} = 0, P_{Li}, Q_{Li}$	$V_i, \delta_i$
Generatorski čvor	P - V	$P_{Gi}, V_i, P_{Li}, Q_{Li}$	$Q_{Gi}, \delta_i$

Za određivanje jednadžbi čvorova i tokova snaga, mora se definirati neto snaga čvora  $i$   $S_i$  koja predstavlja razliku kompleksnih prividnih snaga generatora  $S_{Gi}$  i potrošača  $S_{Li}$ . [9]

$$S_i = P_i + jQ_i = S_{Gi} - S_{Li} = P_{Gi} - P_{Li} + j(Q_{Gi} - Q_{Li}) \quad (2-1)$$



**Slika 2.2. Pojednostavljeni prikaz čvora i a) s generatorima, potrošačima i prijenosnim vodovima, b) sa simbolom za neto čvorišnu snagu i prijenosnim vodovima [10]**

Slika 2.2. a) prikazuje čvor  $i$  na kojega je spojena elektrana  $S_{Gi}$  i potrošači  $S_{Li}$ , dok slika 2.2. b) prikazuje simbol za neto čvorišnu snagu  $i$   $S_i$  koja predstavlja injektiranu snagu u čvor  $i$  posredstvom sabirničkog izvora.

Prema [9], neto prividna snaga čvora "i"  $S_i$  i čvorišna struja  $I_i$  povezani su izrazom:

$$S_i = V_i I_i^* \quad (2-2)$$

Prema matricnoj jednadžbi koja glasi:

$$I_k = Y_k V_k \quad (2-3)$$

gdje su:

- $I_k$  – kompleksne čvorišne struje,
- $Y_k$  – matrica admitancije čvorova,
- $V_k$  – fazni napon čvorova.

Prema formuli (2-3), odnosno prema proširenom obliku (2-4) moguće je dobiti struju čvora  $i$  (2-5). [9]

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_1 \\ \bar{I}_2 \\ \vdots \\ \bar{I}_i \\ \vdots \\ \bar{I}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{y}_{11} & \bar{y}_{12} & \cdots & \bar{y}_{1i} & \cdots & \bar{y}_{1n} \\ \bar{y}_{21} & \bar{y}_{22} & \cdots & \bar{y}_{2i} & \cdots & \bar{y}_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \bar{y}_{i1} & \bar{y}_{i2} & \cdots & \bar{y}_{ii} & \cdots & \bar{y}_{in} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \bar{y}_{n1} & \bar{y}_{n2} & \cdots & \bar{y}_{ni} & \cdots & \bar{y}_{nn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{V}_1 \\ \bar{V}_2 \\ \vdots \\ \bar{V}_i \\ \vdots \\ \bar{V}_n \end{bmatrix} \quad (2-4)$$

$$I_i = y_{i1}V_1 + y_{i2}V_2 + \cdots + y_{ii}V_i + \cdots + y_{in}V_n = \sum_{j=1}^n y_{ij}V_j \quad (2-5)$$

Iz jednadžbi (2-2) i (2-5) neto snaga čvora  $i$  iznosi:

$$S_i = V_i \sum_{j=1}^n y_{ij}^* V_j^* \quad (2-6)$$

Kompleksni naponi  $V_i$  svode se na istu referentnu os. Ona prema dogovoru pada u smjeru fazora napona referentnog čvora, odnosno čvora broj 1. [9]

$$V_i = V_i \angle \delta_i; i = 2, 3, \dots, n \quad (2-7)$$

Prema (2-7), za referentni čvor vrijedi:

$$V_i = V_i \angle 0^\circ \quad (2-8)$$

Kompleksni elementi  $y_{ij}$  matrice admitancije čvora  $Y_k$  uz pomoć polarnih koordinata prikazuju se na sljedeći način:

$$y_{ij} = y_{ij} \angle \theta_{ij}; i = j = 1, 2, \dots, n \quad (2-9)$$

Ako se uzmu u obzir (2-7), (2-8) i (2-9) te jednađba za neto snagu čvora  $i$  (2-6) dobije se sljedeće:

$$P_i + jQ_i = \sum_{j=1}^n V_i V_j y_{ij} e^{j(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij})}; i = 1, 2, \dots, n \quad (2-10)$$

Prema (2-10) mogu se odvojiti djelatna i jalova snaga, a time su predstavljene jednađbe tokova snaga. [9]

$$P_i = P_{Gi} - P_{Li} = \sum_{j=1}^n V_i V_j y_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}); i = 1, 2, \dots, n \quad (2-11)$$

$$Q_i = Q_{Gi} - Q_{Li} = \sum_{j=1}^n V_i V_j y_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}); i = 1, 2, \dots, n \quad (2-12)$$

### **3. FOTONAPONSKI SUSTAVI**

Fotonaponski (FN) sustavi predstavljaju integriran skup fotonaponskih modula i pripadajućih komponenti. Projektirani su tako da primarnu Sunčevu energiju izravno pretvaraju u konačan proizvod, električnu energiju. Tom električnom energijom se osigurava rad određenog broja istosmjernih i izmjeničnih trošila koja mogu raditi samostalno ili odvojeno s pričuvnim izvorom.

Fotonaponski sustavi se ovisno o načinu rada mogu podijeliti na:

- autonomne fotonaponske sustave,
- mrežne fotonaponske sustave,

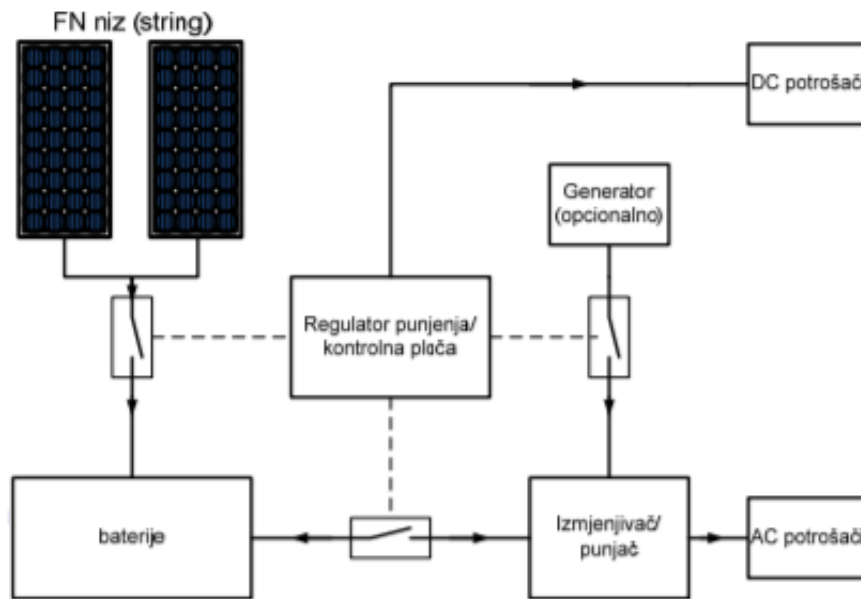
Osnovni dijelovi fotonaponskog sustava su:

- fotonaponski niz,
- postolje za postavljanje prema Suncu,
- tragač maksimalne snage,
- regulacijski uređaj,
- baterije kod autonomnih fotonaponskih sustava,
- izmjenjivač. [11]

#### **3.1. Autonomni fotonaponski sustavi**

Autonomni fotonaponski sustavi su oni sustavi koji samostalno opskrbljuju potrošače bez spoja na mrežu. Budući da nisu spojeni na mrežu oni moraju pokriti cjelokupnu potrebu potrošača za električnom energijom. S obzirom na promjenjivi dotok energije Sunčevog zračenja koji je ovisan o vremenskim uvjetima, proizvodnja iz elektrane ne može pratiti potrebe potrošača te su zbog toga potrebni spremnici energije. U spremnike energije se pohranjuje energija kada je to moguće te se ona koristi u vrijeme kada je proizvodnja minimalna ili jednaka nuli. Autonomne fotonaponske elektrane mogu biti i bez spremnika energije, tada se koriste za napajanje potrošača električnom energijom samo u ono vrijeme kada je ona dostupna. [11]





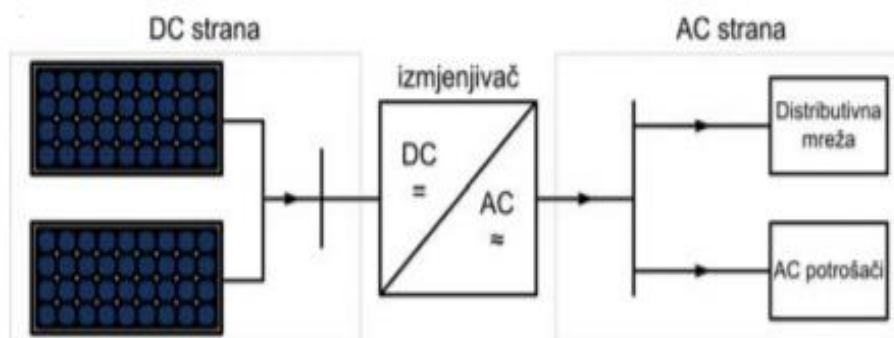
**Slika 3.1.** *Autonomni fotonaponski sustav [11]*

Osnovni dijelovi ovakvog sustava su :

- fotonaponski moduli,
- regulator punjenja,
- spremnik energije,
- trošila,
- izmjenjivač.

### 3.2. Mrežni fotonaponski sustavi

Mrežni fotonaponski sustavi su oni sustavi koji su spojeni na elektroenergetsku mrežu. Proizvedena električna energija se kao takva direktno koristi za DC potrošače, dok se u izmjenjivaču pretvara u izmjeničnu energiju, napaja AC potrošače te ima spoj na mrežu. U ovakvom sustavu punjači i baterije nisu potrebni jer se sva snaga koja se ne potroši predaje u mrežu. [11]



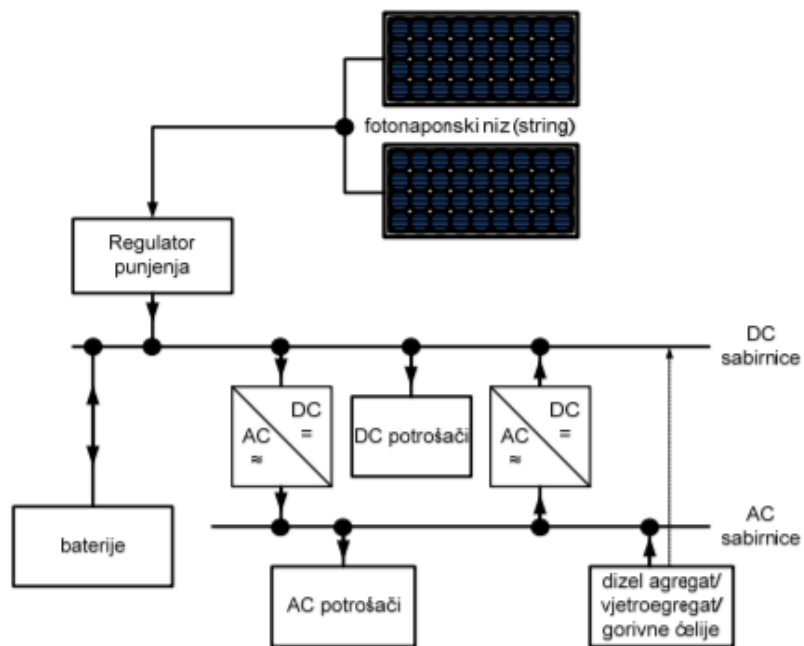
**Slika 3.2.** Mrežni fotonaponski sustav [11]

Ovisno o načinu spajanja fotonaponskog niza mogu se razlikovati sljedeće izvedbe mrežnih fotonaponskih sustava:

- izvedba s centralnim izmjenjivačem,
- izvedba s jednim izmjenjivačem za svaki fotonaponski niz,
- izvedba s više izmjenjivača.

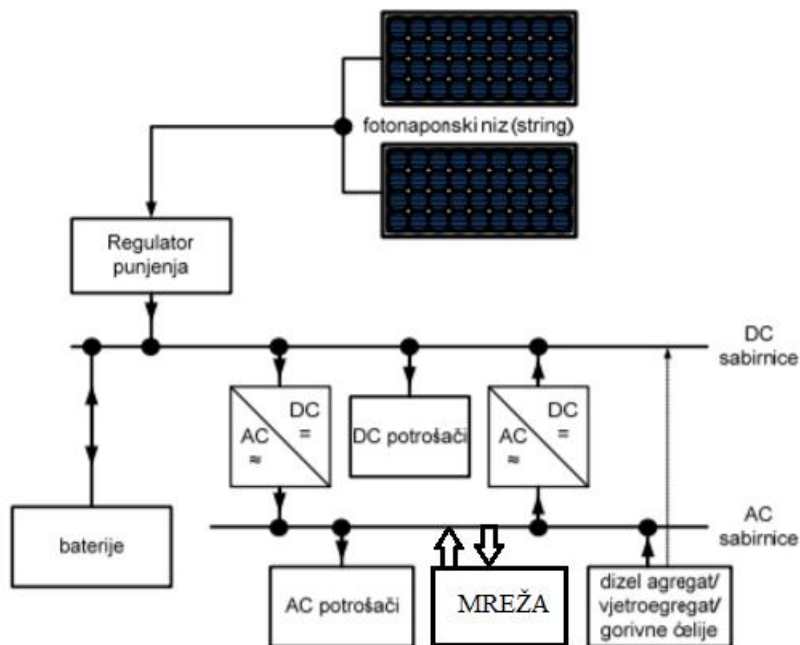
### 3.3. Hibridni fotonaponski sustavi

Hibridni fotonaponski sustavi su oni sustavi koji su kombinacija fotonaponskog sustava s još jednim izvorom električne energije. Taj drugi izvor mogu biti dizel agregati, vjetroagregati ili gorivne ćelije. Prednost izvedbi s vjetroagregatom je ta što tijekom noćnih sati kada proizvodnje iz fotonaponske elektrane nema, postoji velika vjerojatnost da ima vjetra te na taj način se upotpunjuju. Kod izvedbi s dizel agregatom mora se voditi računa o njegovom opterećenju. Kako bi bio učinkovit, dizel agregat mora biti opterećen s minimalno 70-80% nazivnog opterećenja te tada pokriva vršnu potrošnju sustava. Kod izvedbe s gorivnim ćelijama tijekom dana kada ima viška proizvedene električne energije dio se, osim u baterije, može u postupku elektrolize iskoristiti za dobivanje vodika. Njega se u slučajevima kada nema dovoljno Sunčevog zračenja za pokrivanje potrošnje može iskoristiti za dodatnu proizvodnju električne energije. [11]



**Slika 3.3.** Hibridni fotonaponski sustav [11]

Spajanjem hibridnog fotonaponskog sustava na mrežu dobiva se mikromreža. Mikromreža može sadržavati drugi izvor električne energije koji nije obavezan.



**Slika 3.4.** Mikromreža

## **4. KUPCI S VLASTITOM PROIZVODNjom**

Kupac s vlastitom proizvodnjom (eng. prosumer) je postojeći ili novi korisnik mreže koji unutar svoje instalacije ima priključenu elektranu koju koristi za vlastite potrebe, a višak električne energije predaje u elektroenergetsku mrežu. Kupac s vlastitom proizvodnjom je korisnik mreže koji na istom obračunskom mjernom mjestu ima odobrenu priključnu snagu u smjeru kupca i priključnu snagu u smjeru proizvodnje. [12]

Tehnologije u kombinaciji fotonaponskog sustava i tereta spojenog na distribucijsku mrežu mogu se koristiti u sljedećim oblicima:

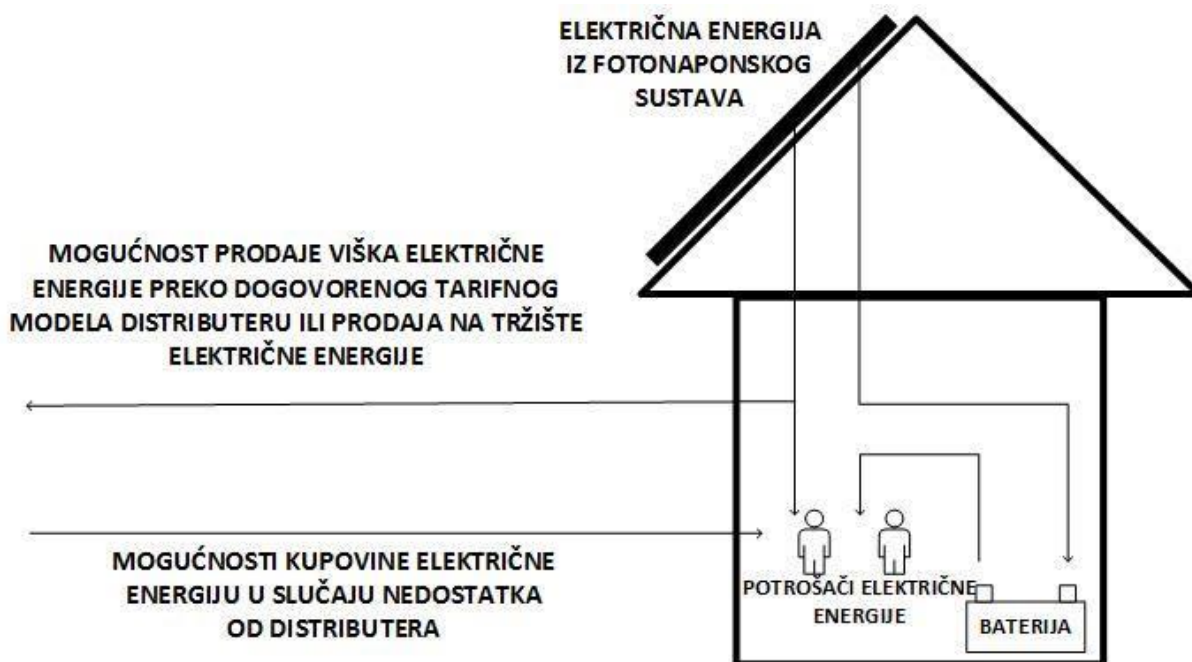
- obiteljska kuća,
- tvrtka kao investitor,
- koncept izvođača radova,
- komercijalne zgrade,
- opterećenje koje se može kontrolirati,
- zgrada gdje investitor prodaje električnu energiju stanarima,
- zajednička pohrana,
- virtualna elektrana. [13]

Rješenja su određena aplikacijom u kojoj se sustav može koristiti, također obuhvaća sve veličine fotonaponskih sustava gdje se proizvedena energija jednim dijelom troši na samoj lokaciji, a ostali dio se ili pohranjuje ili predaje u mrežu.

### **4.1. Obiteljska kuća kao kupac s vlastitom proizvodnjom**

Sastoji se od sljedećih elemenata:

- PV moduli,
- potošnje,
- PV pretvarač,
- sustava za pohranu električne energije,
- mrežni priključak,
- sustav za upravljanje energijom.



**Slika 4.1.** *Obiteljska kuća kao kupac s vlastitom proizvodnjom*

Električna energija iz fotonaponskih sustava ima prioritet da se troši kad god je to moguće. Prekomjerna električna energija se djelomično pohranjuje u baterijskom sustavu kako bi se u vrijeme kada nema proizvodnje mogla koristiti za napajanje unutar kuće. Kada se baterije napune, ostatak se ubacuje u mrežu. (Slika 4.1.)

Prednosti kupca s vlastitom proizvodnjom unutar obiteljske kuće su:

- ušteda unutar obiteljske kuće zbog potrebe za manjom kupnjom električne energije iz mreže,
- djelomična neovisnost od distributera električne energije,
- niska rizična ulaganja,
- doprinos u izmjeni električne energije.

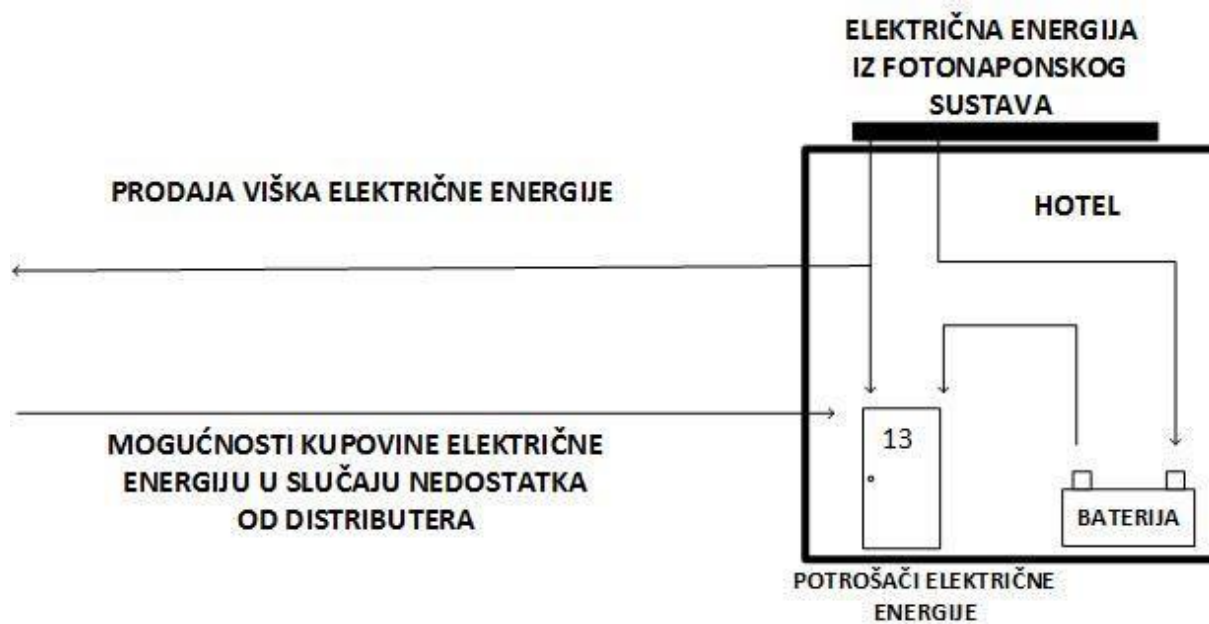
Nedostaci kupca s vlastitom proizvodnjom unutar obiteljske kuće su:

- primjenjivo samo za vlasnike obiteljskih kuća,
- visoki troškovi ulaganja,
- baterija ne mora nužno imati pozitivan utjecaj na elektroenergetski sustav. [13]

## 4.2. Tvrtka kao kupac s vlastitom proizvodnjom

Sastoji se od sljedećih elemenata:

- PV moduli,
- mogućnost praćenja Sunca sa PV modulima (izborno),
- PV pretvarač,
- baterijski pretvarač ili pretvarač istosmjerne struje,
- baterija s baterijskim sustavom upravljanja,
- električno vozilo (izborno),
- mjerna oprema,
- sustav upravljanja energijom,
- potrošnja. [13]



**Slika 4.2.** Tvrtka kao kupac s vlastitom proizvodnjom

U ovom slučaju su investitor i kupac s vlastitom proizvodnjom su iste osobe. Na slici 4.2. hotel predstavlja tvrtku koja preko fotonaponskih modula proizvodi električnu energiju koju unutar hotela troši. Višak proizvedene energije u ovisnosti o profitabilnosti se ili pohranjuje ili predaje u mrežu.

Prednosti kupca s vlastitom proizvodnjom unutar tvrtke su:

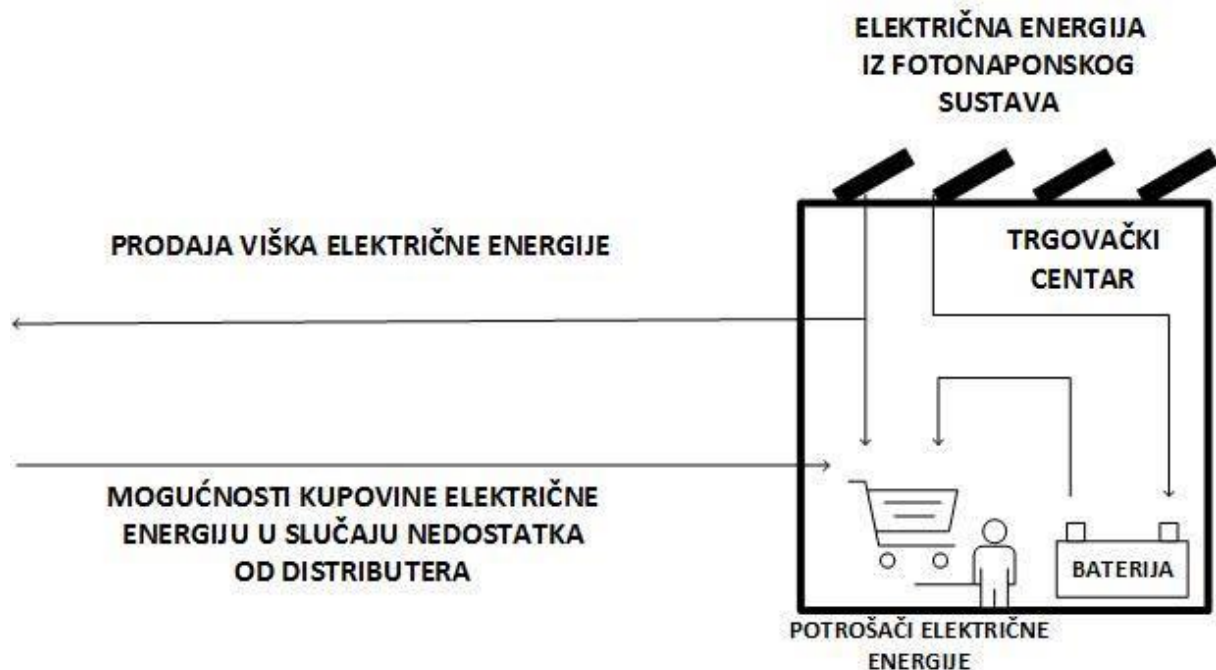
- ušteda unutar tvrtke zbog potrebe za manjom kupovinom električne energije iz mreže,
- djelomična neovisnost od distributera električne energije,
- mogućnost smanjenja vršne potražnje za električnom energijom,
- mogućnost rezerve u slučaju kvara mreže,
- poboljšanje reputacije zbog razvoja održivosti okoliša,
- doprinos u izmjeni električne energije.

Nedostaci kupca s vlastitom proizvodnjom unutar tvrtke su:

- visoki troškovi ulaganja,
- dugi rok povrata. [13]

#### 4.3. Koncept izvođača radova kao kupac s vlastitom proizvodnjom

Sastoji se od istih elemenata kao i prethodni slučaj gdje je tvrtka kao kupac s vlastitom proizvodnjom.



**Slika 4.3.** *Koncept izvođača radova*

Investitor cjelokupnog sustava s fotonaponskim modulima i potrošač nisu iste osobe, to je jedina razlika kod koncepta izvođač radova i tvrtke kao kupca s vlastitom proizvodnjom.

Električna energija proizvedena u fotonaponskom sustavu se izravno troši na licu mjesta, dok se višak električne energije pohranjuje ili odlazi u mrežu. Ako je proizvodnja iz fotonaponskih modula veća od potražnje i pohrana je puna, proizvedena električna energija odlazi u mrežu. Ako nema proizvodnje iz fotonaponskih modula i nema pohranjene električne energije, potrošnja će biti zadovoljena povlačenjem električne energije iz javne mreže. (Slika 4.3.)

Prednosti kupca s vlastitom proizvodnjom kao potrošača:

- nema financijskog rizika,
- mogućnost uštede zbog manje kupnje električne energije iz mreže,
- djelomična neovisnost od distributera električne energije,
- mogućnost smanjenja vršne potražnje za električnom energijom,
- mogućnost rezerve u slučaju kvara mreže,
- poboljšanje reputacije zbog razvoja održivosti okoliša.

Prednosti kupca s vlastitom proizvodnjom kao investitora:

- mogućnost profitiranja od prodaje električne energije krajnjem korisniku unutar zgrade te javnoj mreži.

Nedostaci kupca s vlastitom proizvodnjom kao koncepta izvođača radova:

- visoki troškovi ulaganja,
- dugi rok povrata,
- samo neizravna štednja. [13]

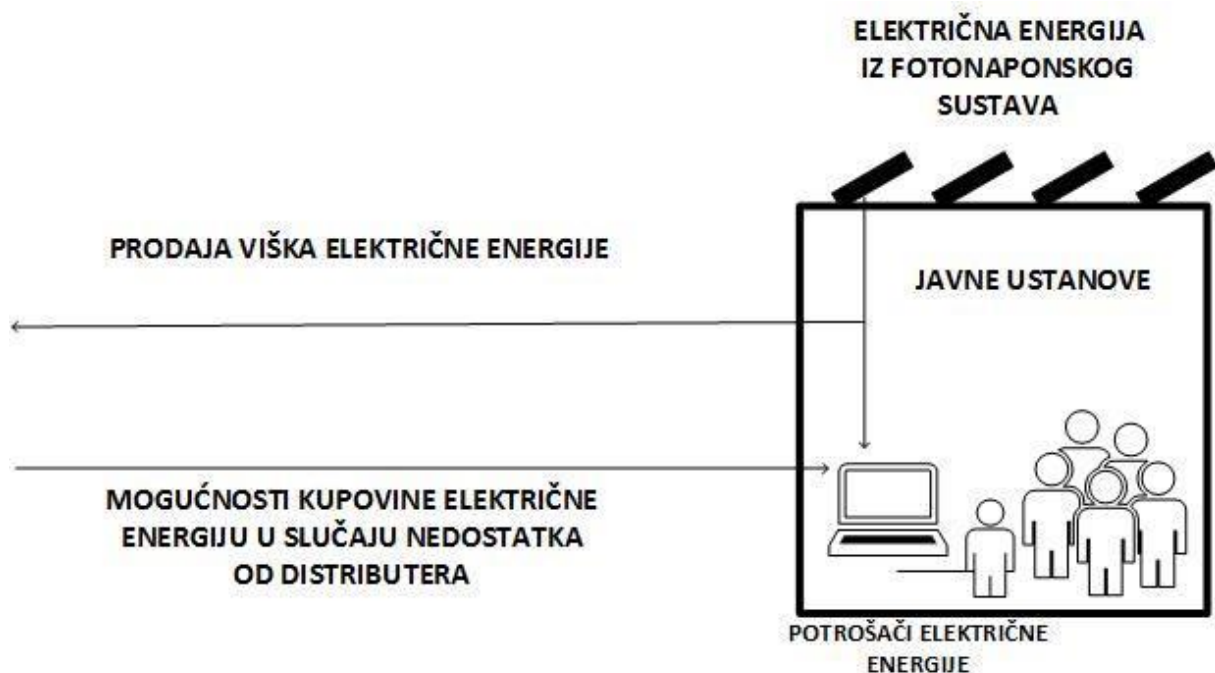
#### **4.4. Komercijalne zgrade kao kupac s vlastitom proizvodnjom**

Sastoje se od sljedećih elemenata:

- PV moduli,
- mogućnost praćenja Sunca sa PV modulima (izborno),
- PV pretvarač,
- baterijski pretvarač ili pretvarač istosmjerne struje (izborno),
- baterija s baterijskim sustavom upravljanja (izborno),
- mjerna oprema,



- sustav upravljanja energijom,
- potrošnja. [13]



**Slika 4.4.** *Komercijalne zgrade kao kupac s vlastitom proizvodnjom*

Prema slici 4.4. u slučaju komercijalne zgrade kao kupca s vlastitom proizvodnjom, investitor i potrošač su jedinstveni. Električna energija koju proizvode fotonaponski moduli, ako je moguće, sama se troši preko sustava za pohranu. Višak energije se dovodi u mrežu kada je spremnik potpuno napunjen. Električnom energijom koja ne može biti pokrivena iz proizvodnje fotonaponskih modula i skladištenjem povlači se iz javne mreže.

Prednosti kupca s vlastitom proizvodnjom kao komercijalne zgrade:

- uštede za državu zbog manje kupnje električne energije iz mreže,
- djelomična neovisnost o distributeru električne energije,
- niska rizična ulaganja,
- doprinos u izmjeni električne energije,

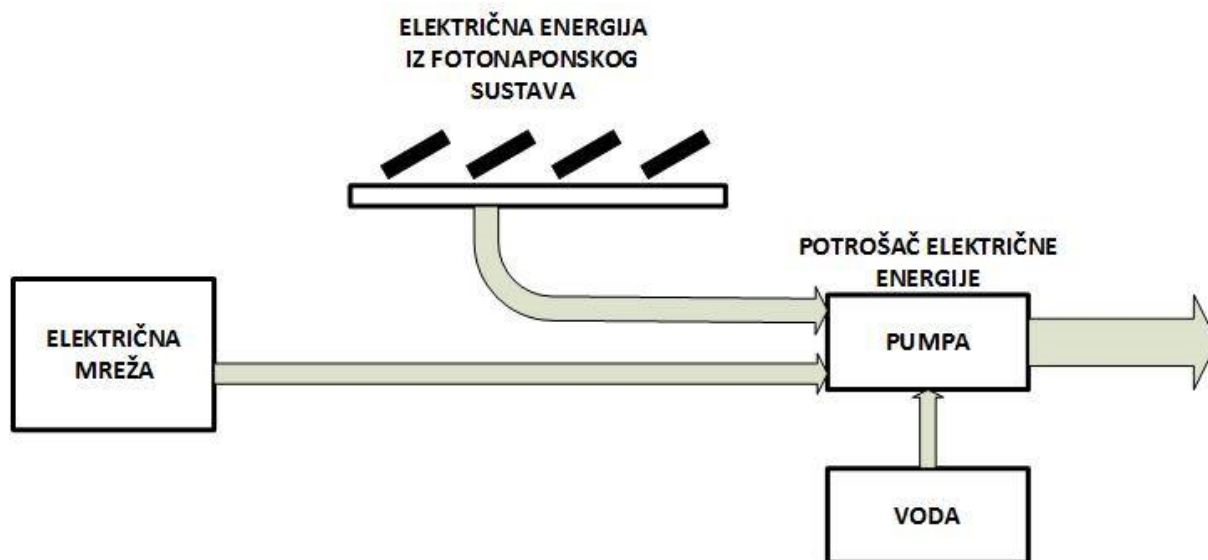
Nedostaci kupca s vlastitom proizvodnjom kao komercijalne zgrade:

- veliki troškovi ulaganja,
- nizak povrat investicije jer se neradnim danima ne troši električna energija. [13]

#### 4.5. Opterećenje koje se može kontrolirati kao kupac s vlastitom proizvodnjom

Sastoji se od sljedećih elemenata:

- PV moduli,
- mogućnost praćenja Sunca sa PV modulima (izborno),
- PV pretvarač,
- baterijski pretvarač ili pretvarač istosmjerne struje (izborno),
- baterija s baterijskim sustavom upravljanja (izborno),
- sustav nadzora,
- mjerna oprema,
- sustav upravljanja energijom,
- potrošnja. [13]



**Slika 4.5.** Opterećenje koje se može kontrolirati

U slučaju kao na slici 4.5. investitor je operator opterećenja koje se može kontrolirati. Fotonaponski sustavi rade kombinirano s kontroliranim opterećenjem. Opterećenje se kontrolira na način da se maksimizira izravna potrošnja iz fotonaponskih sustava za vrijeme jakog Sunčevog zračenja ili da se izbjegne punjenje za vrijeme slabe proizvodnje iz fotonaponskog sustava. Ako je potražnja za električnom energijom veća od raspoložive električne energije iz fotonaponskog sustava ili je ispražnjena baterija, tada se električna energija povlači iz mreže. Pri nedostatku električne energije istu se može uvesti iz mreže. Prednosti kupca s vlastitom proizvodnjom kod opterećenja koje se može kontrolirati:

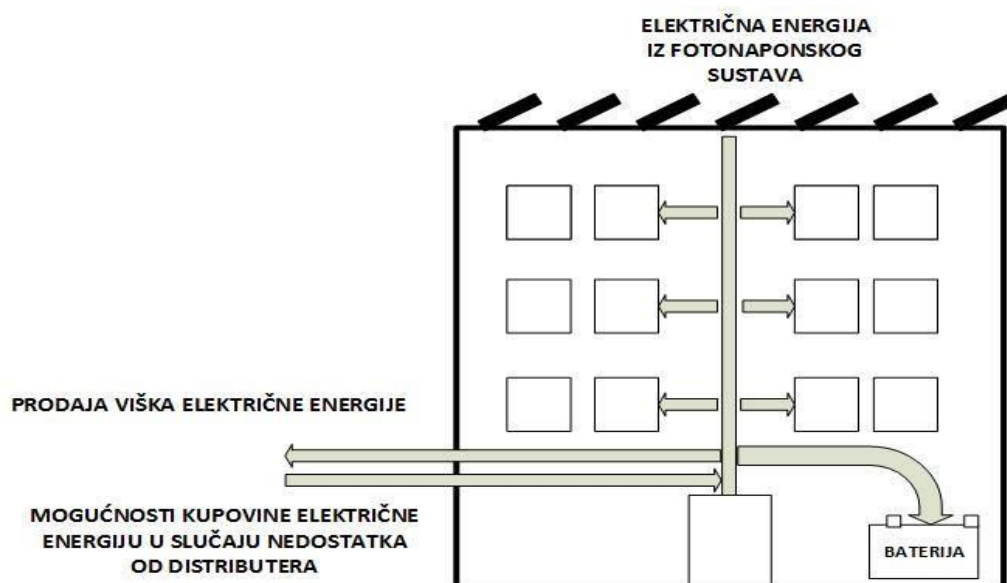
- mogućnost uštede zbog manje kupnje električne energije iz mreže,
- smanjena ovisnost o mreži,
- mogućnost rada u ruralnim područjima bez mogućih dostupnih vodova,
- gotovo bez održavanja i nadzora,
- smanjenje doprinosa globalnom zatopljenju.

Jedini nedostatak ovakve tehnologije su visoki troškovi ulaganja. [13]

#### 4.6. Zgrada gdje investitor prodaje električnu energiju stanarima kao kupac s vlastitom proizvodnjom

Sastoji se od sljedećih elemenata:

- PV moduli,
- mogućnost praćenja Sunca sa PV modulima (izborno),
- PV pretvarač,
- baterijski pretvarač ili pretvarač istosmjerne struje (izborno),
- baterija s baterijskim sustavom upravljanja (izborno),
- sustav nadzora,
- mjerna oprema,
- sustav upravljanja energijom,
- potrošnja. [13]



**Slika 4.6.** Zgrada gdje investitor prodaje električnu energiju stanarima

Kao što je prikazano slikom 4.6. proizvedenu električnu energiju iz fotonaponskih modula troše stanari unutar zgrade. Prekomjerna proizvodnja električne energije se djelomično pohranjuje u baterije kako bi se npr. u noćnim satima mogla potrošiti, dok se ostali dio predaje u mrežu.

Prednosti kupca s vlastitom proizvodnjom kod zgrade gdje investitor prodaje električnu energiju stanarima za stanare:

- mogućnost uštede zbog manje kupnje električne energije iz mreže,
- smanjena ovisnost o mreži,
- doprinos u izmjeni električne energije,

Prednost kupca s vlastitom proizvodnjom kod zgrade gdje investitor prodaje električnu energiju stanarima za investitora je isplativo ulaganje.

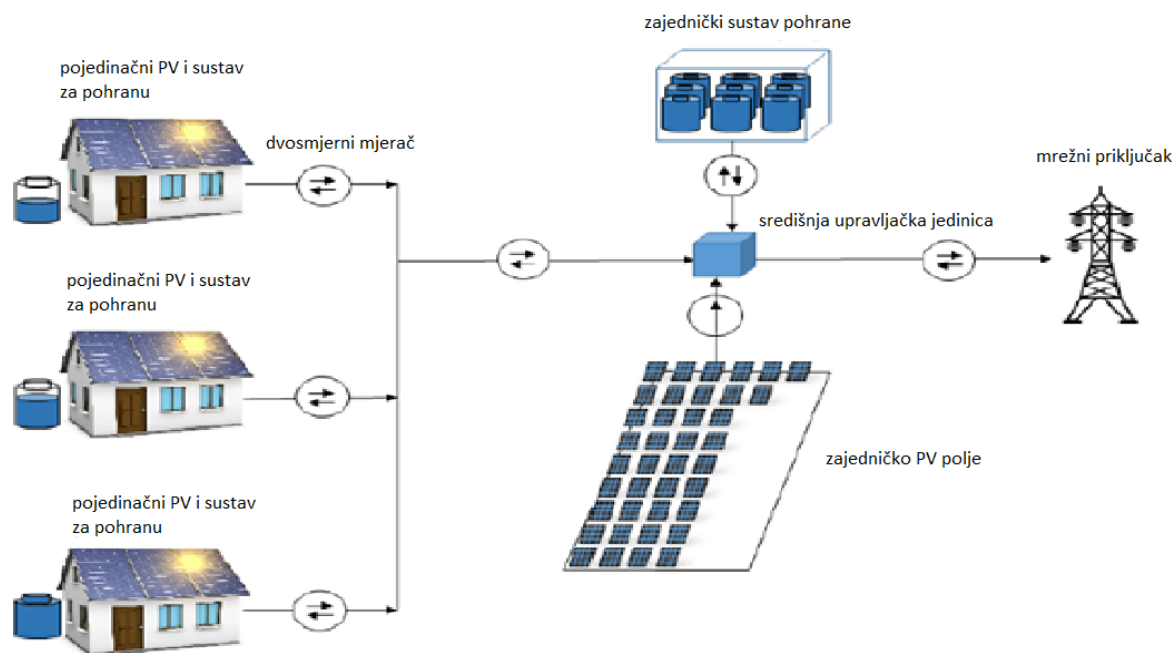
Nedostaci kupca s vlastitom proizvodnjom kod zgrade gdje investitor prodaje električnu energiju stanarima su:

- može se primjeniti kod zgrada u zajednici,
- nizak povrat ulaganja,
- veliki rizik za investitora jer stanari nisu obvezni kupiti električnu energiju proizvedenu iz fotonaponskih modula. [13]

#### **4.7. Zajednička pohrana kao kupac s vlastitom proizvodnjom**

Sastoji se od sljedećih elemenata:

- zajedničkih ili pojedinačnih PV modula,
- sustav za praćenje PV modula (izborno),
- PV pretvarač,
- pojedinačni sustavi baterija (izborno),
- baterijski pretvarač ili pretvarač istosmjerne struje (izborno),
- skladište baterija,
- oprema za mjerenje energije,
- sustav upravljanja energijom,
- potrošnja. [13]



**Slika 4.7.** *Zajednička pohrana* [13]

Kućanstva troše električnu energiju koja može biti iz vlastitih i/ili zajedničkih fotonaponskih sustava kada su dostupni. Prekomjerna električna energija iz fotonaponskih sustava pohranjuje se u individualnom ili zajedničkom sustavu za pohranu ili se predaje u mrežu. Ako postoji potreba za električnom energijom od strane kućanstava, skladišta električne energije mogu ih opskrbljivati električnom energijom. Kada je sustav za pohranu prazan, potražnja će biti pokrivena električnom energijom iz mreže. Svaki fotonaponski sustav sastoji se od fotonaponskih modula i pojedinačnog pretvarača koji omogućuje individualnu potrošnju električne energije. Pretvarač u skladištu električne energije mora imati dovoljnu snagu da bi mogao pohraniti električnu energiju iz spojenih fotonaponskih sustava. U svakom kućanstvu može se instalirati manji sustav za pohranu, ali to je izborni dio rješenja.

Prednosti kupca s vlastitom proizvodnjom kod tehnologije sa zajedničkom pohranom:

- mogućnost uštede zbog manje kupnje električne energije iz mreže,
- smanjena ovisnost o mreži,
- smanjenje vršne potražnje,
- dostupna rezerva u slučaju kvara mreže,
- dijeljenje troškova prilikom investicije između članova zajednice,

- popust na cijenu instalacije,
- primjer za druge zajednice sličnog tipa,
- doprinos u izmjeni električne energije.

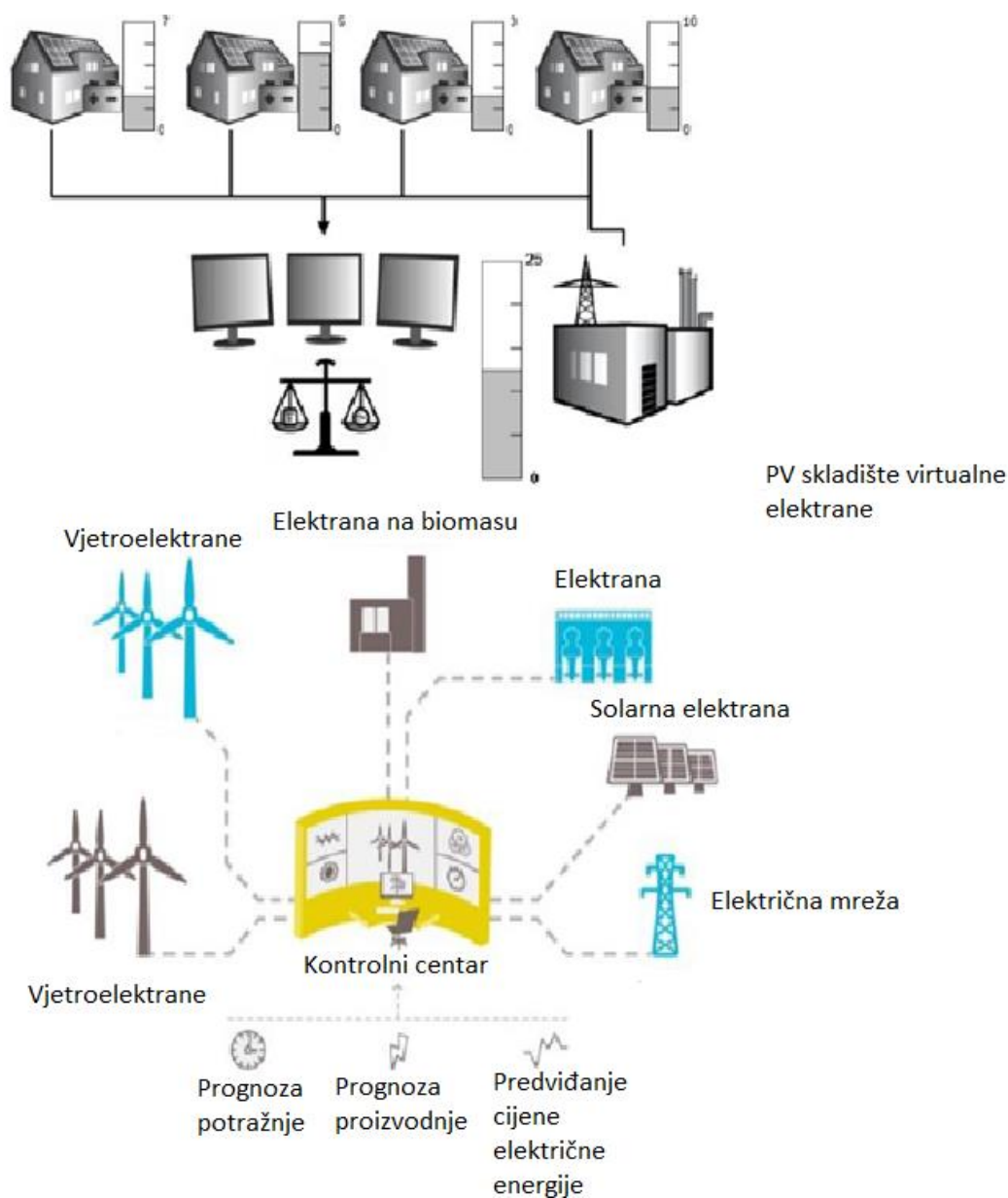
Nedostaci kupca s vlastitom proizvodnjom kod tehnologije sa zajedničkom pohranom:

- visoki troškovi ulaganja,
- visoki porezi kod velikih fotonaponskih instalacija,
- regulatorne barijere u osiguravanju električne energije drugim stranama korištenjem mreže. [13]

#### **4.8. Virtualna elektrana kao kupac s vlastitom proizvodnjom**

Sastoji se od sljedećih elemenata:

- PV moduli,
- PV pretvarač,
- brzo mjerenje na mreži u točki povezivanja,
- kontrolni centar,
- mjerni uređaji,
- komunikacija s kontrolnim centrom,
- baterijski pretvarač ili pretvarač istosmjerne struje (izborno),
- baterija s baterijskim sustavom upravljanja (izborno),
- potrošnja,
- upravljanje lokalnom energijom sustava. [13]



**Slika 4.8.** Virtualna elektrana kao kupac s vlastitom proizvodnjom [13]

Električnom energijom koja je proizvedena iz fotonaponskih modula upravlja se prema ugovoru vlasnika elektrane s vlasnikom virtualne elektrane. Operator virtualne elektrane prodaje proizvedenu energiju u mrežu.

Prednosti kupca s vlastitom proizvodnjom kod tehnologije virtualne elektrane:

- vlasnik fotonaponskog sustava optimizira troškove energije neizravnim sudjelovanjem na tržištu energije,
- vlasnik virtualne elektrane povećava dobit sudjelovanjem na tržištu energijom,

- operator distribucijskog sustava optimizira rad sustav fleksibilnošću virtualne elektrane,
- integracija i upravljanje većim brojem elektrana u isto vrijeme.

Nedostaci kupca s vlastitom proizvodnjom kod tehnologije virtualne elektrane:

- raspršenost elektrana, skladišta energije i opterećenja virtualnih elektrana,
- ugovorom vlasnik virtualne elektrane upravlja radom baterija pa čak i potrošnjom umjesto vlasnika elektrane,
- komunikacijska infrastruktura je skupa i teško dostupna,
- složeni koncepti mjerenja za naplatu. [13]

#### **4.9. Zakon o obnovljivim izvorima za kupce s vlastitom proizvodnjom**

Opskrbljivači električne energije dužni su preuzimati viškove električne energije od krajnjih kupaca s vlastitom proizvodnjom električne energije ili korisnika postrojenja za samoopskrbu koji kumulativno zadovoljavaju sljedeće uvjete:

1. imaju status povlaštenog proizvođača električne energije,
2. da su ostvarili pravo na trajno priključenje na elektroenergetsku mrežu, za proizvodna postrojenja koja se smatraju jednostavnim građevinama,
3. ukupna priključna snaga svih proizvodnih postrojenja na jednom obračunskom mjernom mjestu ne prelazi 500 kW,
4. priključna snaga krajnjeg kupca s vlastitom proizvodnjom ili korisnika postrojenja za samoopskrbu u smjeru isporuke električne energije u mrežu ne prelazi priključnu snagu krajnjeg kupca s vlastitom proizvodnjom ili korisnika postrojenja za samoopskrbu u smjeru preuzimanja električne energije iz mreže,
5. krajnji kupac s vlastitom proizvodnjom ili korisnik postrojenja za samoopskrbu isporučuje električnu energiju preko istog obračunskog mjernog mjesta preko kojeg kupuje električnu energiju od opskrbljivača,
6. krajnji kupac s vlastitom proizvodnjom ili korisnik postrojenja za samoopskrbu vodi podatke o proizvedenoj električnoj energiji i isporučenoj električnoj energiji.

Preuzimanje električne energije od krajnjeg kupca s vlastitom proizvodnjom ili korisnika postrojenja za samoopskrbu uređuje se ugovorom o opskrbi krajnjeg kupca s vlastitom proizvodnjom ili korisnika postrojenja za samoopskrbu koji sklapaju opskrbljivač električne



energije i krajnji kupac s vlastitom proizvodnjom ili korisnik postrojenja za samoopskrbu, a koji sadržava odredbe o preuzimanju viškova električne energije. Krajnji kupac s vlastitom proizvodnjom ili korisnik postrojenja za samoopskrbu dužan je, na zahtjev opskrbljivača s kojim je sklopio ugovor dostaviti podatke o svom proizvodnom postrojenju i/ili proizvodnoj jedinici.

Opskrbljivači električne energije obvezni su, na zahtjev krajnjih kupaca s vlastitom proizvodnjom kojima isporučuju električnu energiju ili korisnika postrojenja za samoopskrbu, u roku od 30 dana od podnošenja zahtjeva, sklopiti ugovor o opskrbi koji sadržava odredbe o preuzimanju viškova proizvedene električne energije iz proizvodnog postrojenja.

Za preuzetu električnu energiju od strane opskrbljivača električne energije utvrđuje se vrijednost električne energije preuzete od krajnjeg kupca s vlastitom proizvodnjom  $C_i$  u obračunskom razdoblju  $i$  na sljedeći način:

1.  $C_i = 0,9 \cdot PKC_i$ , ako za obračunsko razdoblje  $i$  vrijedi:  $E_{pi} \geq E_{ii}$ ,
2.  $C_i = 0,9 \cdot PKC_i \cdot E_{pi}/E_{ii}$ , ako za obračunsko razdoblje  $i$  vrijedi:  $E_{pi} < E_{ii}$ ,

gdje je:

- $E_{pi}$  je ukupna električna energija preuzeta iz mreže od strane kupca unutar obračunskog razdoblja  $i$ , izražena u kn/kWh,
- $E_{ii}$  je ukupna električna energija isporučena u mrežu od strane proizvodnog postrojenja u vlasništvu kupca, unutar obračunskog razdoblja  $i$ , izražena u kn/kWh,
- $PKC_i$  = prosječna jedinična cijena električne energije koju kupac plaća opskrbljivaču za prodanu električnu energiju, bez naknada za korištenje mreže te drugih naknada i poreza, unutar obračunskog razdoblja, izražena u kn/kWh.

Opskrbljivač električne energije u svakom obračunskom razdoblju umanjuje račun za isporučenu električnu energiju krajnjem kupcu s vlastitom proizvodnjom.

Kod obračuna potrošnje električne energije, kao i naknade za korištenje mreže te naknade za obnovljive izvore energije i visokoučinkovitu kogeneraciju, korisnika postrojenja za samoopskrbu, uzima se u obzir količina električne energije koja predstavlja razliku između preuzete i isporučene električne energije u pojedinoj tarifi. Ako je na kraju obračunskog razdoblja količina radne energije isporučena u mrežu u pojedinoj tarifi veća od preuzete, taj višak proizvedene električne energije opskrbljivač je dužan preuzeti po cijeni:

$$C_{iVT} = 0,8 \cdot C_{pVT},$$

$$C_{iNT} = 0,8 * C_{pNT},$$

gdje je:

- $C_{pVT}$  = cijena ukupne električne energije preuzete iz mreže od strane krajnjeg kupca unutar obračunskog razdoblja, za vrijeme trajanja više dnevne tarife, izražena u kn/kWh
- $C_{pNT}$  = cijena ukupne električne energije preuzete iz mreže od strane krajnjeg kupca unutar obračunskog razdoblja, za vrijeme trajanja niže dnevne tarife, izražena u kn/kWh
- $C_{iVT}$  = cijena ukupne električne energije isporučene u mrežu od strane proizvodnog postrojenja u vlasništvu krajnjeg kupca unutar obračunskog razdoblja, za vrijeme trajanja više dnevne tarife, izražena u kn/kWh
- $C_{iNT}$  = cijena ukupne električne energije isporučene u mrežu od strane proizvodnog postrojenja u vlasništvu krajnjeg kupca unutar obračunskog razdoblja, za vrijeme trajanja niže dnevne tarife, izražena u kn/kWh.

Opskrbljivač električne energije u svakom obračunskom razdoblju izdaje račun krajnjem kupcu kategorije kućanstva za razliku između preuzete i isporučene električne energije (kWh) u višoj dnevnoj tarifi i razliku između isporučene i preuzete električne energije (kWh) u nižoj dnevnoj tarifi od strane krajnjeg kupca s vlastitom proizvodnjom. Iste količine su osnova za obračun naknade za korištenje mreže i naknade za obnovljive izvore energije i visokoučinkovitu kogeneraciju.

Obračunsko razdoblje je jedan mjesec.

Opskrbljivač električne energije može ponuditi krajnjem kupcu s vlastitom proizvodnjom ili korisniku postrojenja za samoopskrbu povoljnije uvjete otkupa.

Krajnji kupac s vlastitom proizvodnjom koji ne želi viškove električne energije prodavati svom opskrbljivaču električne energije dužan je sklopiti odgovarajući ugovor s tržišnim sudionikom kojim će se urediti prodaja viškova sukladno odredbama zakona kojim se uređuje tržište električne energije.

Operator distribucijskog sustava dužan je podatke o godišnjoj potrošnji i proizvodnji dostaviti na zahtjev opskrbljivača ili tržišnog sudionika s kojim korisnik postrojenja za samoopskrbu ima sklopljen ugovor.

Opskrbljivač ili tržišni sudionik s kojim korisnik postrojenja za samoopskrbu ima sklopljen ugovor dužan je najkasnije do 31. siječnja tekuće godine izvršiti provjeru ispunjenja uvjeta o ograničenju isporučene električne energije.

Ako opskrbljivač ili tržišni sudionik utvrdi da je korisnik postrojenja za samoopskrbu u prethodnoj kalendarskoj godini u mrežu isporučio više električne energije nego što je preuzeo iz mreže, isti se smatra krajnjim kupcem s vlastitom proizvodnjom u tekućoj kalendarskoj godini. [14]

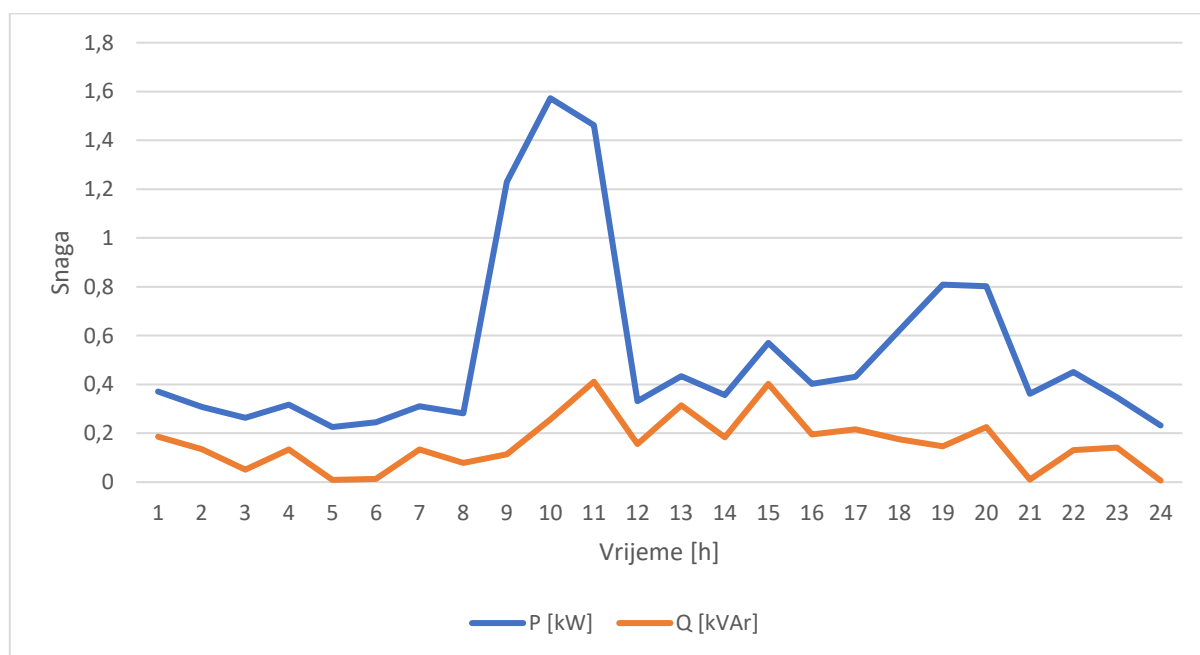
## **5. EKSPERIMENTALNO ODREĐIVANJE STRUJNO-NAPONSKIH PRILIKA U STVARNOM VREMENU**

U programskom paketu DigSILENT na modelu distributivne mreže 10/0,4 kV odrediti će se utjecaj na mrežu s velikom razinom priključenih kupaca s vlastitom proizvodnjom u stvarnom vremenu. Eksperiment se sastoji od tri dijela. Prvi dio je referentni slučaj koji se sastoji od 20 potrošača kao obiteljske kuće te 10 potrošača kao komercijalne zgrade, bez proizvodnje. Drugi dio distributivne mreže 1. slučaja sastoji se od 10 kupaca s vlastitom proizvodnjom kao obiteljske kuće te 5 kupaca s vlastitom proizvodnjom kao komercijalne zgrade, podijeljen je u dva slučaja, a to su sunčani dan i promjenjivi dan. Treći dio distributivne mreže 2. slučaja sastoji se od 20 kupaca s vlastitom proizvodnjom kao obiteljske kuće te 10 kupaca s vlastitom proizvodnjom kao komercijalne zgrade, podijeljen je u dva slučaja, a to su sunčani dan i promjenjivi dan. U svim dijelovima za povezivanje sabirnice 0,4 kV i komercijalnih zgrada su korišteni kabeli  $3 \times 300 \text{ mm}^2$ , od kojih je svaki dužine po 20 metara. Također, kućanstva su u svim dijelovima povezana s jednim paralelnim vodom nazivne struje 0,2 kA, od kojih je svaki dužine po 20 metara.

Profil kupca s vlastitom proizvodnjom kao obiteljske kuće predstavlja opterećenje jednog uobičajenoga kućanstva te proizvodnju električne energije iz fotonaponske elektrane koja se nalazi na krovu kuće. Profil kupca s vlastitom proizvodnjom kao komercijalna zgrada predstavlja opterećenje zgrade Fakulteta elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku te proizvodnju električne energije iz fotonaponske elektrane koja se nalazi na krovu zgrade fakulteta. Profil kućanstva je sedmodnevno mjerenje 10-minutnih srednjih vrijednosti potrošnje radne snage električne energije kućanstva te faktora snage iz kojega je zatim izračunata potrošnja jalove snage. Na osnovu toga mjerenja uzet je jedan dan mjerenja, a to je 8.3.2019. te on predstavlja profil potrošnje kućanstva. Mjerenja su vršena mrežnim analizatorom u glavnom razvodnom ormaru kućanstva. Iz 10-minutnih srednjih vrijednosti izračunati su satni prosjeci za radnu i jalovu snagu. Profil zgrade fakulteta dolazi iz baze podataka laboratorija za obnovljive izvore energije (<http://reslab.ferit.hr/?measurements>) iz koje su preuzeti jednominutni prosjeci potrošnje radne i jalove snage na mjestu priključka na mrežu za dan 22.5.2017. Iz jednominutnih prosjeka izračunati su satni prosjeci potrošnje radne i jalove snage. Profili proizvodnje fotonaponskog (FN) sustava su također preuzeti iz baze podataka laboratorija za obnovljive

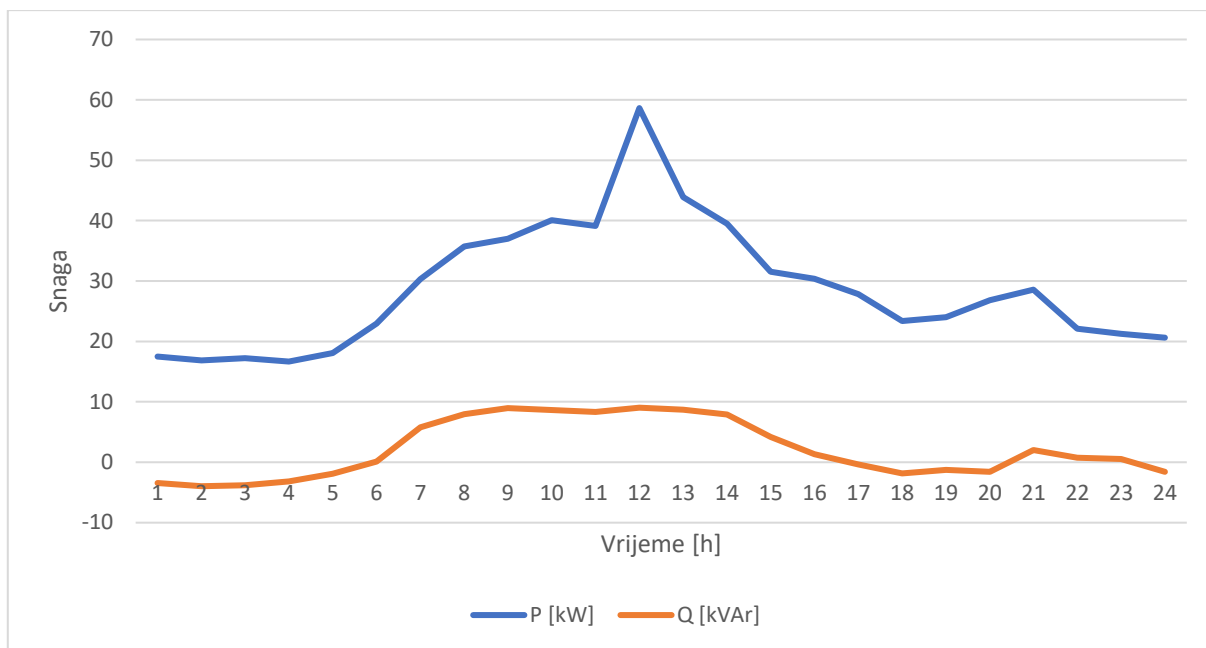
izvore energije i to s izmjenične strane izmjenjivača 10 kW FN elektrane ETFOS1 za dva dana od kojih 1.8.2018. predstavlja sunčani dan, a 24.9.2018. promjenjivi dan. Originalni profili proizvodnje 10 kW FN sustava ETFOS1 je skaliran na način da za kućanstvo vršna proizvodnja za sunčani i promjenjivi dan iznosi približno 5 kW, dok za zgradu fakulteta iznosi 60 kW.

Slika 5.1. predstavlja potrošnju radne i jalove snage za kućanstvo vršne potrošnje od 5kW na razini jednog dana. Pozitivna jalova snaga označava induktivni karakter potrošača.



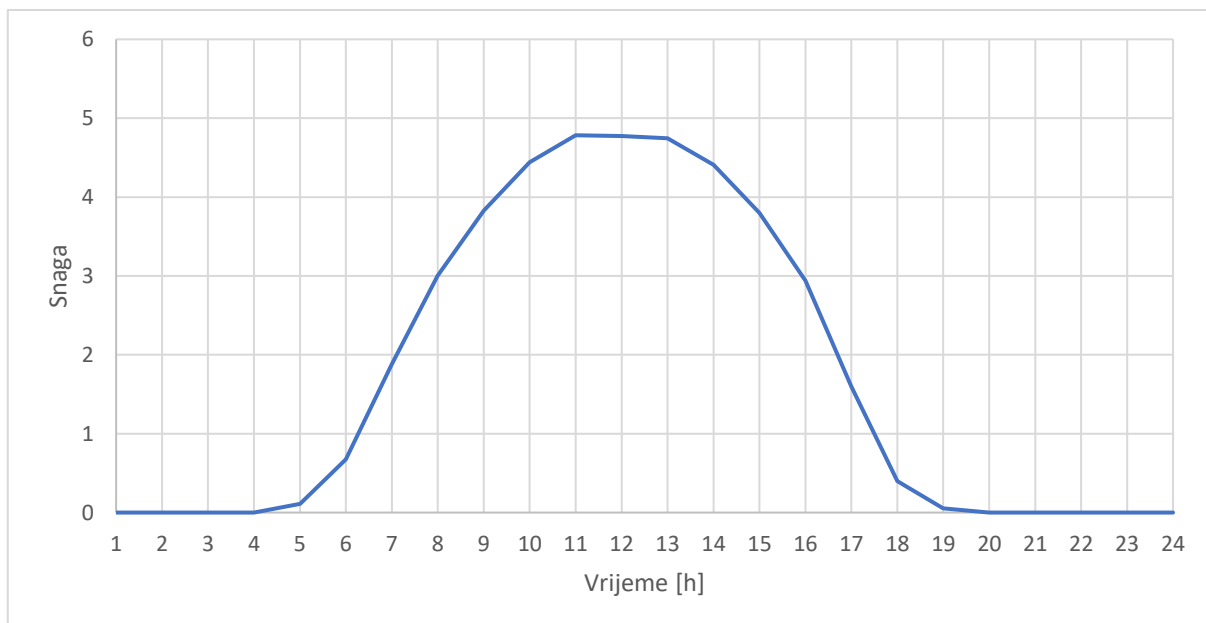
**Slika 5.1.** Opterećenje kućanstva

Slika 5.2. predstavlja potrošnju radne i jalove snage za zgradu fakulteta vršne potrošnje od 60kW na razini jednog dana. Tijekom dana se mijenja predznak jalove snage. S obzirom na to pozitivna jalova snaga označava induktivni karakter potrošača, dok negativna jalova snaga označava kapacitivni karakter potrošača.



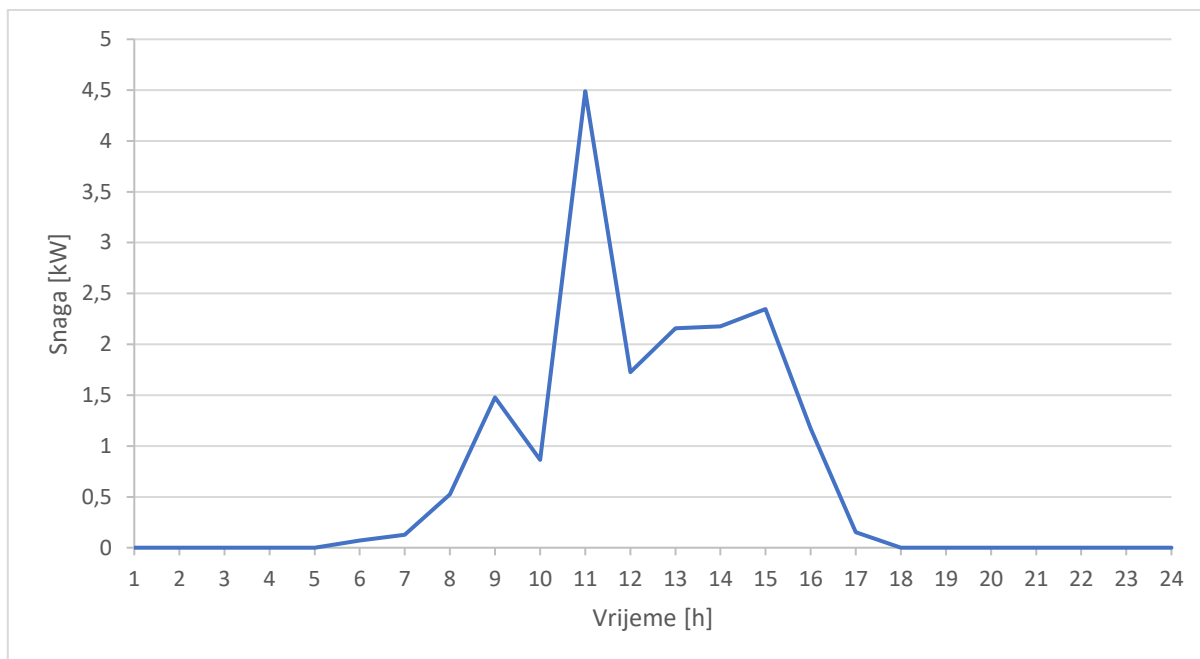
**Slika 5.2.** *Opterećenje zgrade fakulteta*

Slika 5.3. predstavlja proizvodnju električne energije sunčanog dana iz fotonaponske elektrane kućanstva za razdoblje cijelog dana. Fotonaponski sustavi rade s faktorom snage 1, pri čemu sve što se proizvede predstavlja radnu snagu. Dakle, proizvodnja jalove snage jednaka je 0.



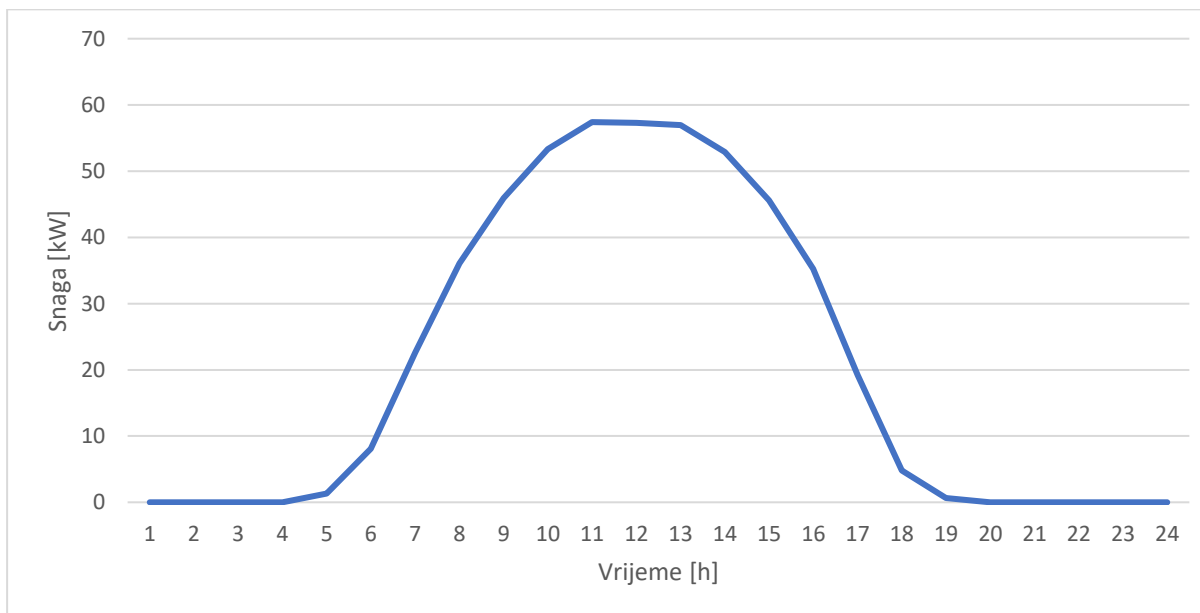
**Slika 5.3.** *Profil proizvodnje fotonaponske elektrane kućanstva za sunčani dan*

Slika 5.4. predstavlja proizvodnju električne energije promjenjivog dana iz fotonaponske elektrane kućanstva za razdoblje cijelog dana.



**Slika 5.4.** *Profil proizvodnje fotonaponske elektrane kućanstva za promjenjivi dan*

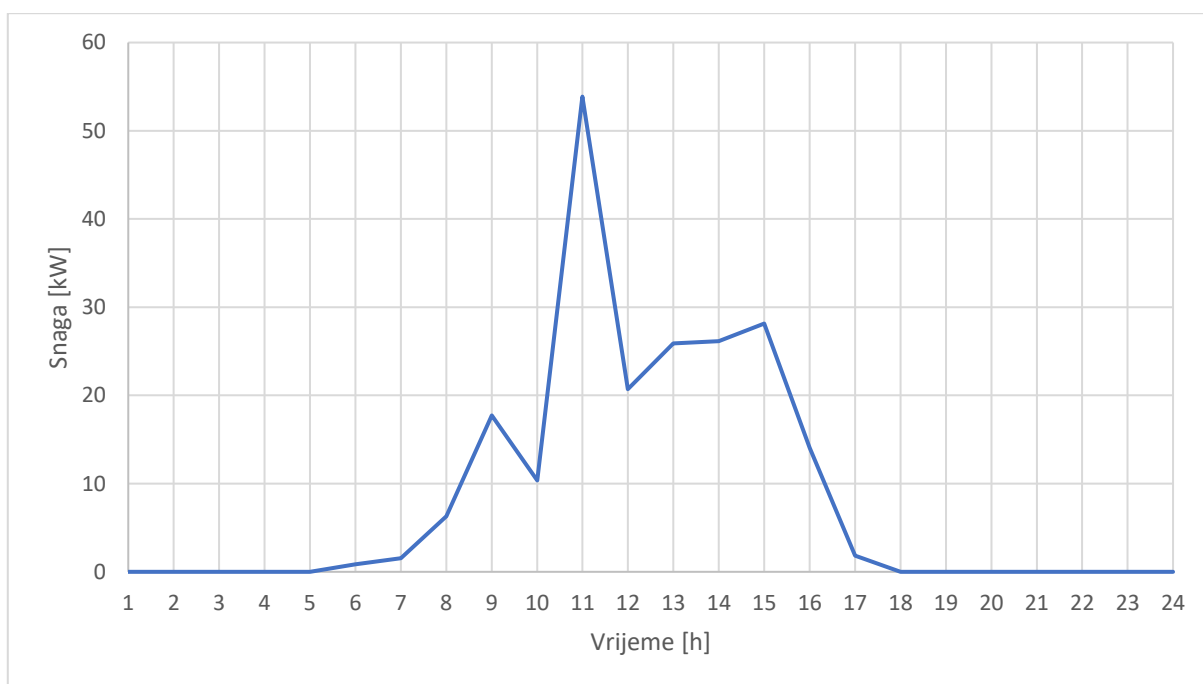
Slika 5.5. predstavlja proizvodnju električne energije sunčanog dana iz fotonaponske elektrane zgrade fakulteta za razdoblje cijelog dana.



**Slika 5.5.** *Profil proizvodnje fotonaponske elektrane zgrade fakulteta za sunčani dan*

Slika 5.6. predstavlja proizvodnju električne energije promjenjivog dana iz fotonaponske elektrane zgrade fakulteta za razdoblje cijelog dana.

U eksperimentalnom dijelu simulirati će se tokovi snage. Promatrat će se naponi, struje i snage. Naponi će biti promatrani na sabirnicama 10 kV, 0,4 kV, S5, S10, S15, S20, S25, S30. Struje i snage promatrati će se na sabirnici TS 10/0,4 kV te vodovima: „vod – komercijalne zgrade“, „vod – parna strana“ te „vod – neparna strana“. Također, promatrati će se ukupni gubici radne i jalove snage u mreži. Simulacije su izvedene na način da se svaki sat vršilo mjerenje s podacima za taj sat i tako 24 puta te je to predstavljalo jedan dan. Na taj način izvršena su mjerenja za referentni slučaj, 1. slučaj sunčanog dana, 1. slučaj promjenjivog dana, 2. slučaj sunčanog dana i 2. slučaj promjenjivog dana. Svi slučajevi odvijali su se na isti način, zbog usporedivosti rezultata.

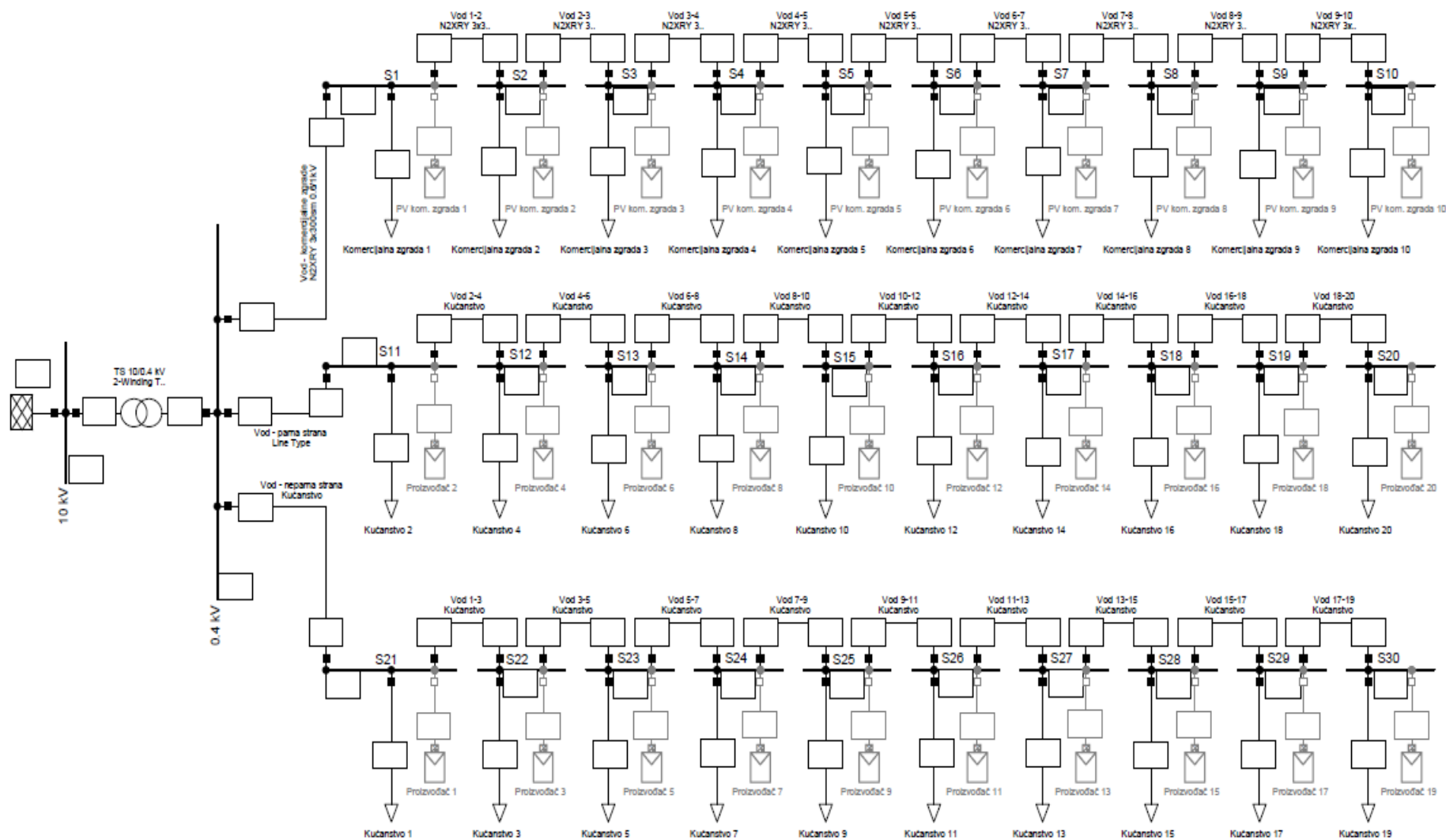


**Slika 5.6.** *Profil proizvodnje fotonaponske elektrane zgrade fakulteta za promjenjivi dan*

### 5.1. Referentni slučaj

U ovom slučaju mreža se sastoji od 20 potrošača koji predstavljaju kućanstva te 10 potrošača koji predstavljaju komercijalne zgrade. Oni su spojeni na mrežu te niti jedan od njih nema vlastitu proizvodnju.

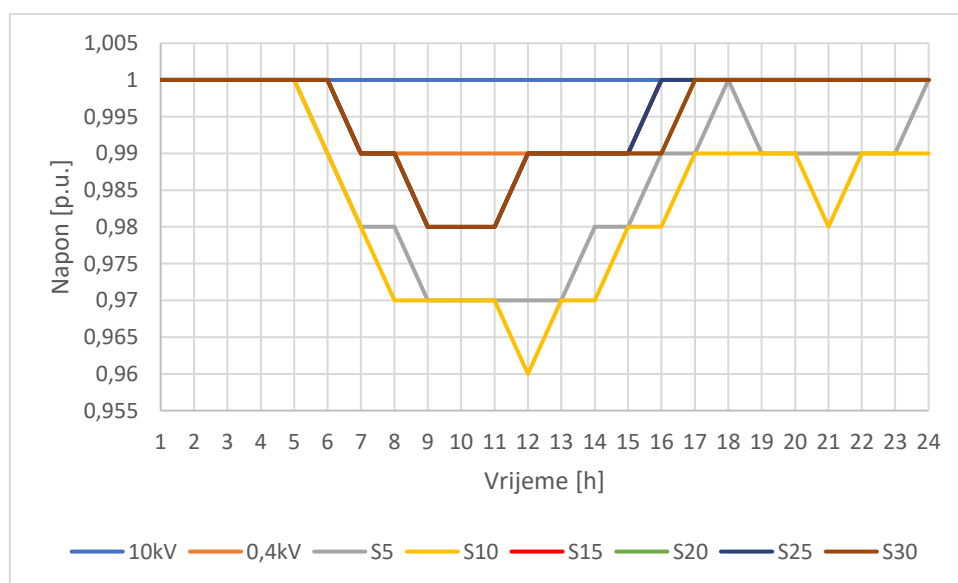




Slika 5.7. Jednopolna shema distribucijske mreže za referentni slučaj

**Tablica 5.1.** *Naponi na sabirnicama za referentni dan*

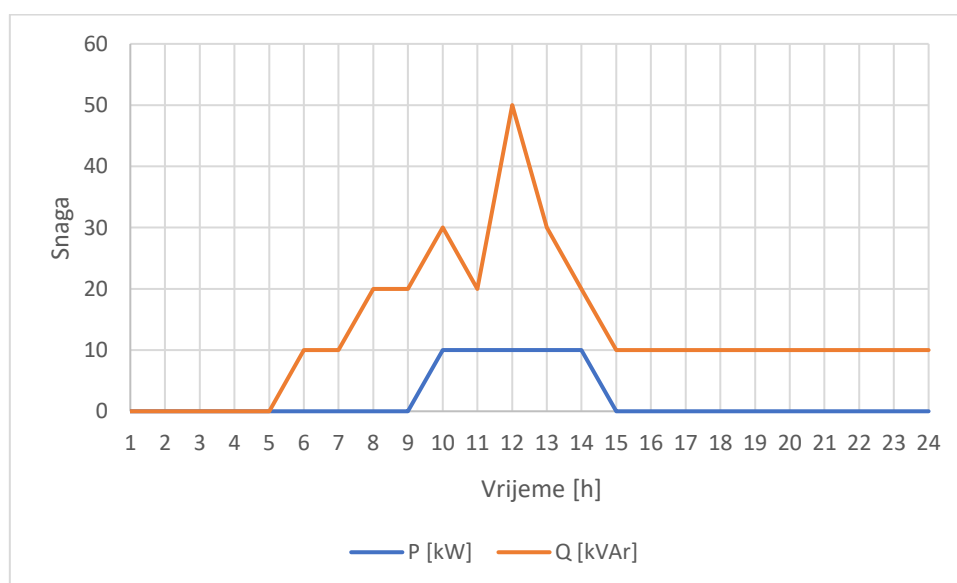
Vrijeme u danu	10kV	0,4kV	S5	S10	S15	S20	S25	S30
	p.u.	p.u.	p.u.	p.u.	p.u.	p.u.	p.u.	p.u.
1h	1	1	1	1	1	1	1	1
2h	1	1	1	1	1	1	1	1
3h	1	1	1	1	1	1	1	1
4h	1	1	1	1	1	1	1	1
5h	1	1	1	1	1	1	1	1
6h	1	1	0,99	0,99	1	1	1	1
7h	1	0,99	0,98	0,98	0,99	0,99	0,99	0,99
8h	1	0,99	0,98	0,97	0,99	0,99	0,99	0,99
9h	1	0,99	0,97	0,97	0,98	0,98	0,98	0,98
10h	1	0,99	0,97	0,97	0,98	0,98	0,98	0,98
11h	1	0,99	0,97	0,97	0,98	0,98	0,98	0,98
12h	1	0,99	0,97	0,96	0,99	0,99	0,99	0,99
13h	1	0,99	0,97	0,97	0,99	0,99	0,99	0,99
14h	1	0,99	0,98	0,97	0,99	0,99	0,99	0,99
15h	1	0,99	0,98	0,98	0,99	0,99	0,99	0,99
16h	1	1	0,99	0,98	1	0,99	1	0,99
17h	1	1	0,99	0,99	1	1	1	1
18h	1	1	1	0,99	1	1	1	1
19h	1	1	0,99	0,99	1	1	1	1
20h	1	1	0,99	0,99	1	1	1	1
21h	1	1	0,99	0,98	1	1	1	1
22h	1	1	0,99	0,99	1	1	1	1
23h	1	1	0,99	0,99	1	1	1	1
00h	1	1	1	0,99	1	1	1	1



**Slika 5.8.** *Naponi na sabirnicama za referentni dan*

**Tablica 5.2.** *Ukupni gubici za referentni dan*

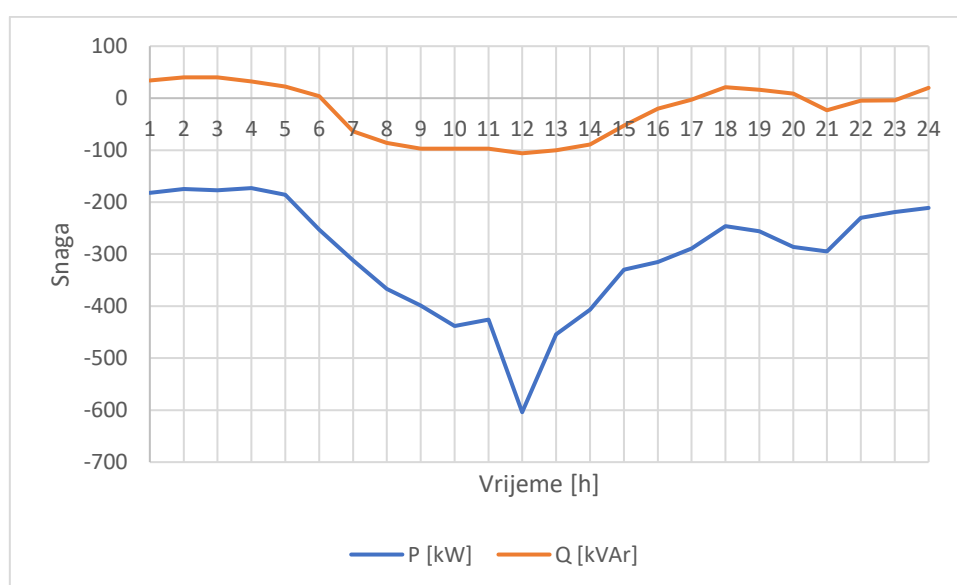
Vrijeme u danu	P [kW]	Q [kVAr]
1h	0	0
2h	0	0
3h	0	0
4h	0	0
5h	0	0
6h	0	10
7h	0	10
8h	0	20
9h	0	20
10h	10	30
11h	10	20
12h	10	50
13h	10	30
14h	10	20
15h	0	10
16h	0	10
17h	0	10
18h	0	10
19h	0	10
20h	0	10
21h	0	10
22h	0	10
23h	0	10
00h	0	10



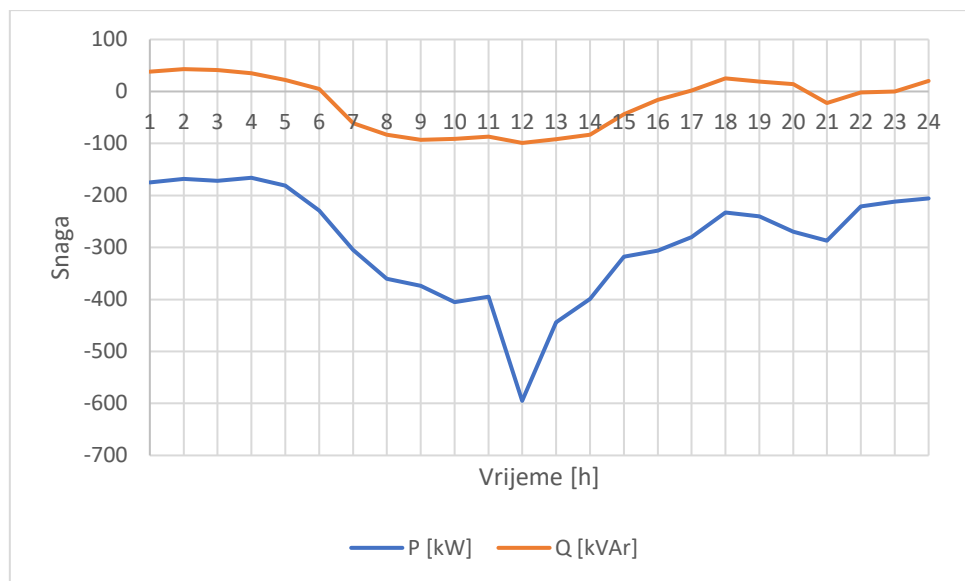
**Slika 5.9.** *Ukupni gubici za referentni dan*

**Tablica 5.3. Tokovi snage za referentni dan**

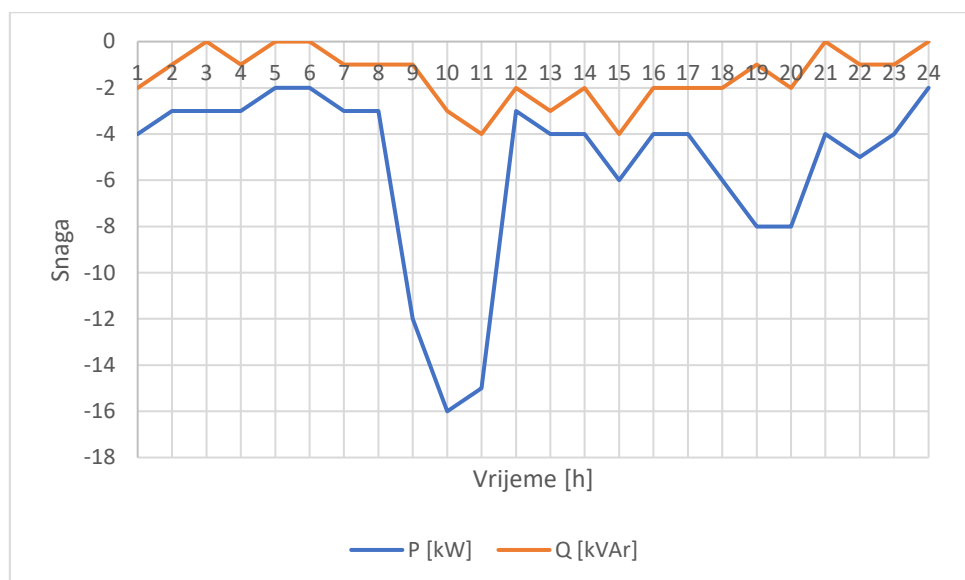
Vrijeme u danu	TS 10/0,4 kV		Vod – komercijalne zgrade		Vod – neparna strana		Vod – parna strana	
	P	Q	P	Q	P	Q	P	Q
	kW	kVAr	kW	kVAr	kW	kVAr	kW	kVAr
1h	-182	34	-175	38	-4	-2	-4	-2
2h	-175	40	-168	43	-3	-1	-3	-1
3h	-177	40	-172	41	-3	0	-3	0
4h	-173	32	-166	35	-3	-1	-3	-1
5h	-186	22	-181	22	-2	0	-2	0
6h	-253	4	-229	5	-2	0	-2	0
7h	-312	-64	-305	-61	-3	-1	-3	-1
8h	-367	-86	-360	-83	-3	-1	-3	-1
9h	-399	-97	-374	-93	-12	-1	-12	-1
10h	-438	-97	-405	-91	-16	-3	-16	-3
11h	-426	-97	-395	-87	-15	-4	-15	-4
12h	-604	-106	-595	-99	-3	-2	-3	-2
13h	-454	-100	-444	-92	-4	-3	-4	-3
14h	-407	-89	-399	-83	-4	-2	-4	-2
15h	-330	-53	-318	-44	-6	-4	-6	-4
16h	-315	-20	-306	-16	-4	-2	-4	-2
17h	-289	-3	-280	2	-4	-2	-4	-2
18h	-246	21	-233	25	-6	-2	-6	-2
19h	-256	16	-240	19	-8	-1	-8	-1
20h	-286	9	-270	14	-8	-2	-8	-2
21h	-295	-23	-287	-22	-4	0	-4	0
22h	-230	-5	-221	-2	-5	-1	-5	-1
23h	-219	-4	-212	0	-4	-1	-4	-1
00h	-211	20	-206	20	-2	0	-2	0



**Slika 5.10. Tokovi snage na sabirnici TS 10/0,4 kV za referentni dan**



**Slika 5.11.** Tokovi snage na sabirnici Vod – komercijalne zgrade za referentni dan

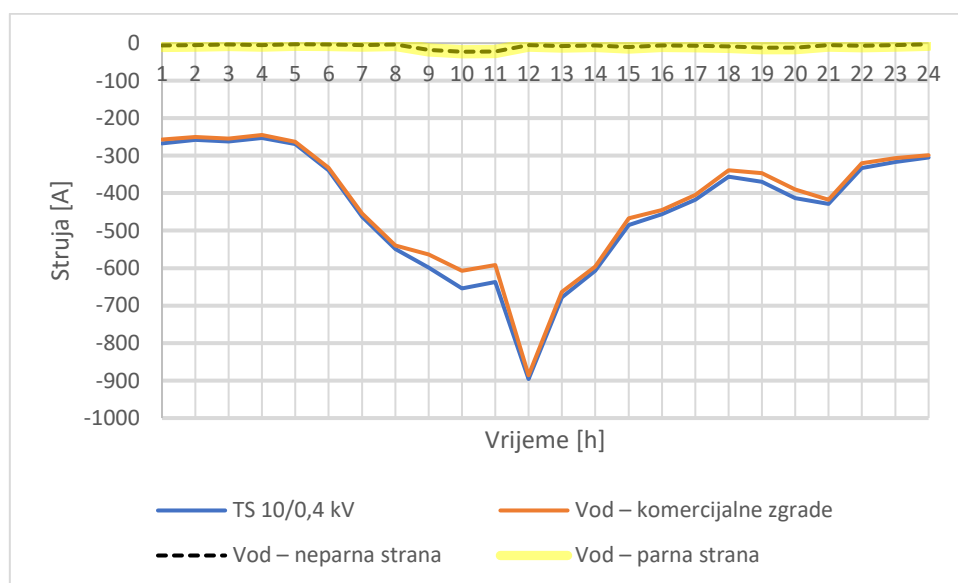


**Slika 5.12.** Tokovi snage na sabirnici Vod – parna i neparna strana za referentni dan

**Tablica 5.4.** Strujna opterećenja za referentni dan

Vrijeme u danu	TS 10/0,4 kV	Vod – komercijalne zgrade	Vod – neparna strana	Vod – parna strana
	A	A	A	A
1h	-267	-257	-6	-6
2h	-258	-250	-5	-5
3h	-262	-255	-4	-4
4h	-253	-245	-5	-5
5h	-269	-263	-3	-3

6h	-339	-332	-4	-4
7h	-463	-454	-5	-5
8h	-549	-540	-4	-4
9h	-599	-564	-18	-18
10h	-654	-607	-23	-23
11h	-637	-592	-22	-22
12h	-896	-886	-5	-5
13h	-678	-664	-8	-8
14h	-607	-596	-6	-6
15h	-485	-467	-10	-10
16h	-456	-445	-6	-6
17h	-418	-405	-7	-7
18h	-356	-339	-9	-9
19h	-370	-347	-12	-12
20h	-413	-390	-12	-12
21h	-429	-418	-5	-5
22h	-333	-320	-7	-7
23h	-317	-307	-5	-5
00h	-305	-299	-3	-3



**Slika 5.13.** Strujna opterećenja za referentni dan

Iz provedenog mjerenja za referentni dan koji je prikazan grafovima i tablicama iznad može se zaključiti da do najvećeg pada napona dolazi na sabirnicama komercijalnih zgrada i to u 12h kada je njihovo opterećenje najveće. Kod sabirnica na koje su spojena kućanstva najveće opterećenje je u 10h, a tada je i najveći pad napona. U noćnim satima na sabirnicama komercijalnih zgrada dolazi do neznajčajnog pada napona, dok na sabirnicama kućanstva nema pada napona te on iznosi 1 p.u.

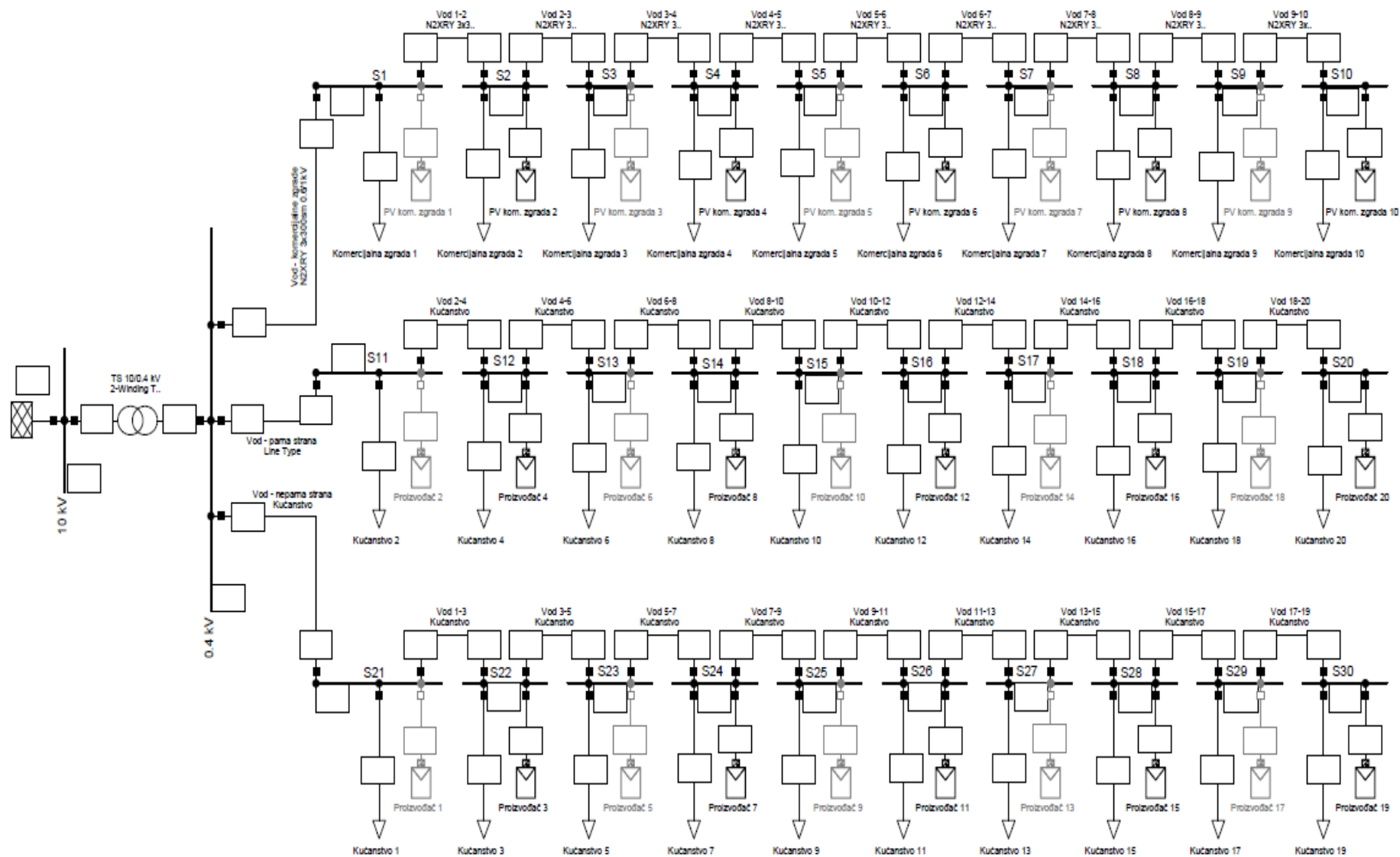
Gubici radne snage javljaju se u rasponu od 10h do 14h, dok u ostatku dana iznose približno 0, zbog ograničenja programa koji gubitke iskazuje jedino u MW i MVAr području. Gubici jalove snage javljaju se tijekom gotovo cijelog dana, a najveći su u 12h i iznose 50 kVAr.

Tok radne i jalove snage prati promjene opterećenja komercijalnih zgrada i kućanstava spojenih na mrežu tijekom cijelog dana. Povećanje opterećenja tijekom dana prati povećanje toka radne snage, odnosno zbog veće potražnje za energijom povećava se tok radne snage koja prolazi kroz promatrane vodove. Tok radne snage na svim promatranim mjestima je negativan, što predstavlja konstantno povlačenje energije iz mreže. Tijekom noćnih sati tok jalove snage na „TS 10/0,4 kV“ i „vod – komercijalne zgrade“ je pozitivan, što je posljedica kapacitivnog karaktera potrošnje komercijalnih zgrada u noćnim satima. Zbog pretpostavljenog smjera kada energija ide u mrežu tada je predznak pozitivan. Kako dan odmiče i kako se povećava potreba za električnom energijom tako se povećava tok jalove snage iz mreže prema potrošačima. Na „vod – parna strana“ i „vod – neparna strana“ uglavnom je tijekom dana tok jalove snage induktivnog karaktera što predstavlja povlačenje jalove snage iz mreže.

Strujna su opterećenja na svim promatranim mjestima tijekom dana negativnog predznaka. Razlog tomu je negativan predznak radne snage. Kako se povećavalo opterećenje kod potrošača tako se i vrijednost struje povećavala, prema tome na „vod – komercijalne zgrade“ najveća je vrijednost struje u 12h, dok je na „vod – parna strana“ i „vod – neparna strana“ zabilježena najveća vrijednost struje u 10h.

## **5.2. Distributivna mreža – 1. slučaj**

U ovom slučaju mreža se sastoji od 10 kupaca s vlastitom proizvodnjom kao obiteljske kuće te 5 kupaca s vlastitom proizvodnjom kao komercijalne zgrade. Od svih kupaca, njih pola predstavljaju kupce sa vlastitom proizvodnjom, dok ostali predstavljaju samo potrošače koji ne proizvode električnu energiju.



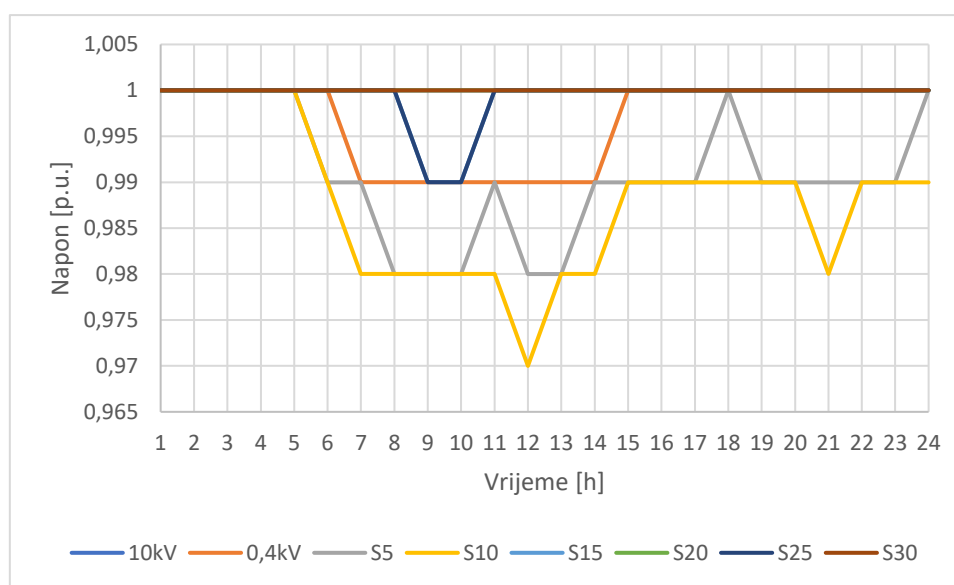
Slika 5.14. Jednopolna shema distribucijske mreže za 1. slučaj



### 5.2.1. Sunčani dan

**Tablica 5.5.** *Naponi na sabirnicama za 1. slučaj sunčanog dana*

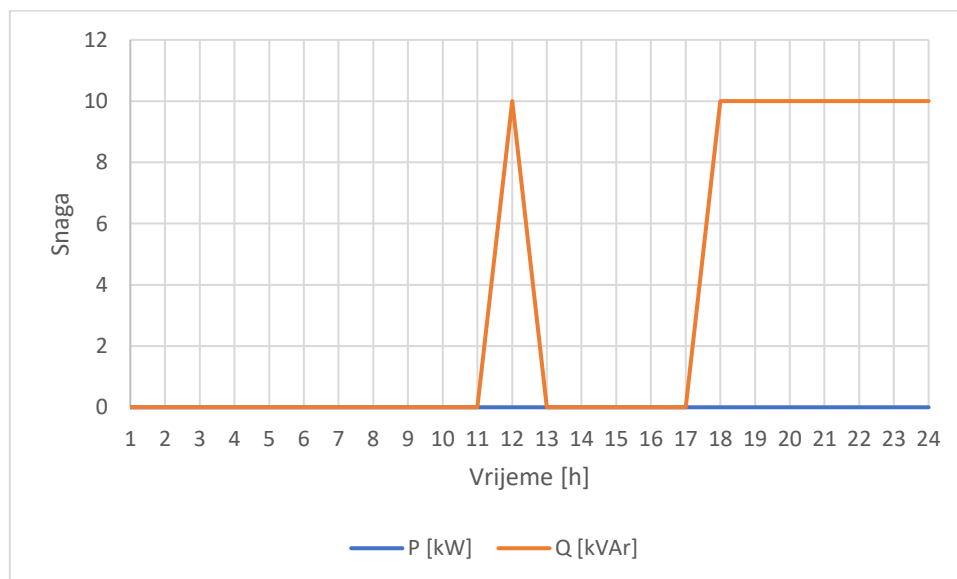
Vrijeme u danu	10kV	0,4kV	S5	S10	S15	S20	S25	S30
	p.u.	p.u.	p.u.	p.u.	p.u.	p.u.	p.u.	p.u.
1h	1	1	1	1	1	1	1	1
2h	1	1	1	1	1	1	1	1
3h	1	1	1	1	1	1	1	1
4h	1	1	1	1	1	1	1	1
5h	1	1	1	1	1	1	1	1
6h	1	1	0,99	0,99	1	1	1	1
7h	1	0,99	0,99	0,98	1	1	1	1
8h	1	0,99	0,98	0,98	1	1	1	1
9h	1	0,99	0,98	0,98	0,99	1	0,99	1
10h	1	0,99	0,98	0,98	0,99	1	0,99	1
11h	1	0,99	0,99	0,98	1	1	1	1
12h	1	0,99	0,98	0,97	1	1	1	1
13h	1	0,99	0,98	0,98	1	1	1	1
14h	1	0,99	0,99	0,98	1	1	1	1
15h	1	1	0,99	0,99	1	1	1	1
16h	1	1	0,99	0,99	1	1	1	1
17h	1	1	0,99	0,99	1	1	1	1
18h	1	1	1	0,99	1	1	1	1
19h	1	1	0,99	0,99	1	1	1	1
20h	1	1	0,99	0,99	1	1	1	1
21h	1	1	0,99	0,98	1	1	1	1
22h	1	1	0,99	0,99	1	1	1	1
23h	1	1	0,99	0,99	1	1	1	1
00h	1	1	1	0,99	1	1	1	1



**Slika 5.15.** *Naponi na sabirnicama za 1. slučaj sunčanog dana*

**Tablica 5.6.** Ukupni gubici za 1. slučaj sunčanog dana

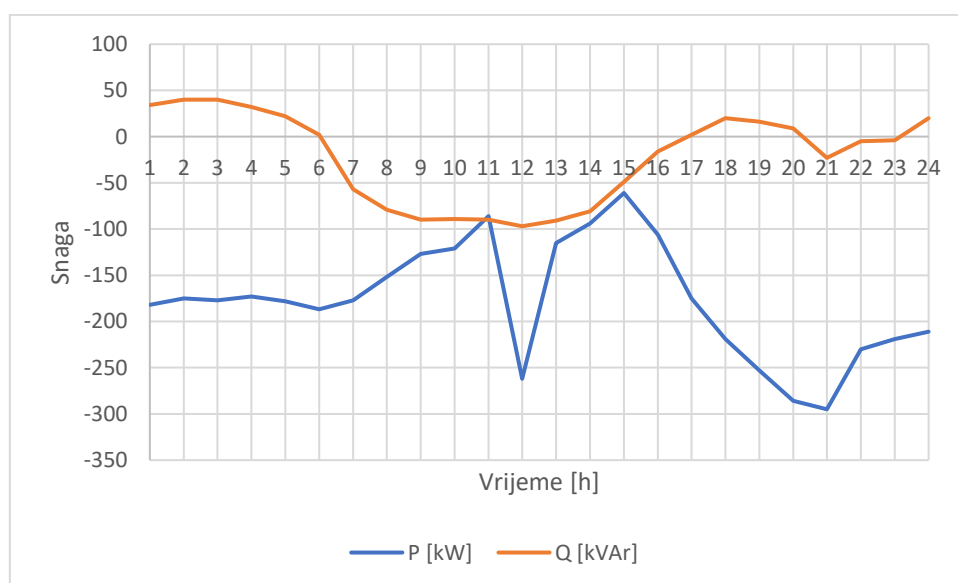
Vrijeme u danu	P [kW]	Q [kVAr]
1h	0	0
2h	0	0
3h	0	0
4h	0	0
5h	0	0
6h	0	0
7h	0	0
8h	0	0
9h	0	0
10h	0	0
11h	0	0
12h	0	10
13h	0	0
14h	0	0
15h	0	0
16h	0	0
17h	0	0
18h	0	10
19h	0	10
20h	0	10
21h	0	10
22h	0	10
23h	0	10
00h	0	10



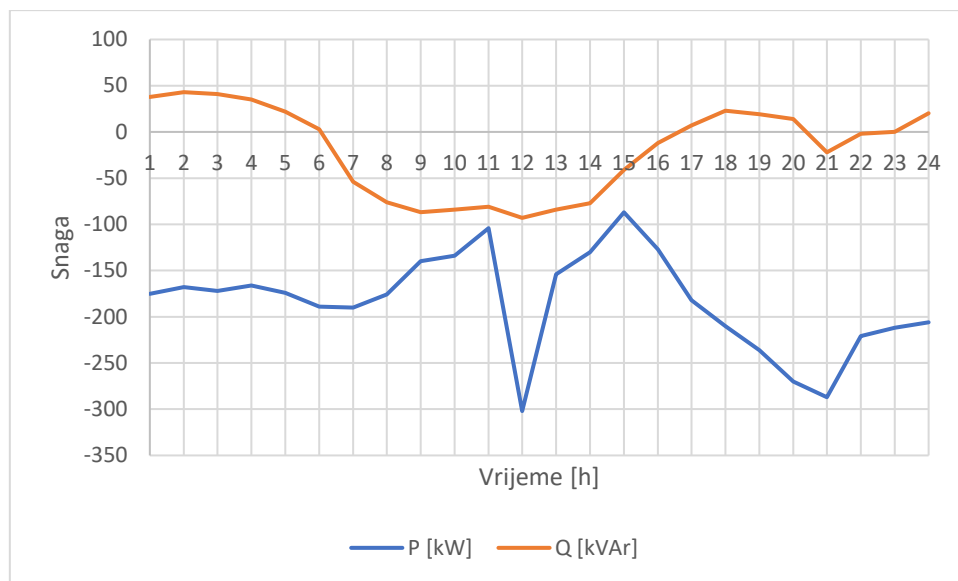
**Slika 5.16.** Ukupni gubici za 1. slučaj sunčanog dana

**Tablica 5.7.** Tokovi snage za 1. slučaj sunčanog dana

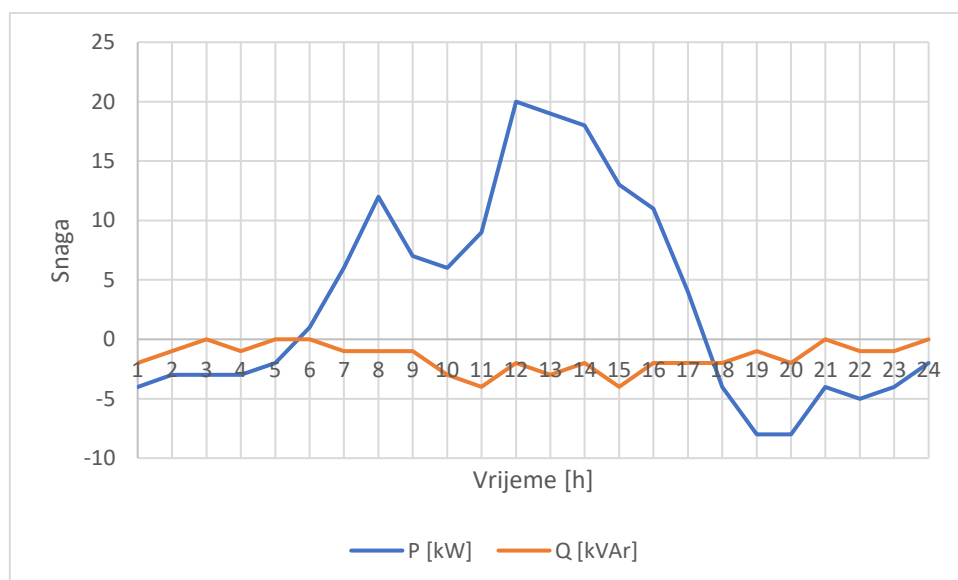
Vrijeme u danu	TS 10/0,4 kV		Vod – komercijalne zgrade		Vod – neparna strana		Vod – parna strana	
	P	Q	P	Q	P	Q	P	Q
	kW	kVAr	kW	kVAr	kW	kVAr	kW	kVAr
1h	-182	34	-175	38	-4	-2	-4	-2
2h	-175	40	-168	43	-3	-1	-3	-1
3h	-177	40	-172	41	-3	0	-3	0
4h	-173	32	-166	35	-3	-1	-3	-1
5h	-178	22	-174	22	-2	0	-2	0
6h	-187	2	-189	3	1	0	1	0
7h	-177	-57	-190	-54	6	-1	6	-1
8h	-152	-79	-176	-76	12	-1	12	-1
9h	-127	-90	-140	-87	7	-1	7	-1
10h	-121	-89	-134	-84	6	-3	6	-3
11h	-86	-90	-104	-81	9	-4	9	-4
12h	-262	-97	-302	-93	20	-2	20	-2
13h	-115	-91	-154	-84	19	-3	19	-3
14h	-94	-81	-130	-77	18	-2	18	-2
15h	-61	-49	-87	-41	13	-4	13	-4
16h	-106	-16	-127	-12	11	-2	11	-2
17h	-175	2	-182	7	4	-2	4	-2
18h	-219	20	-210	23	-4	-2	-4	-2
19h	-253	16	-236	19	-8	-1	-8	-1
20h	-286	9	-270	14	-8	-2	-8	-2
21h	-295	-23	-287	-22	-4	0	-4	0
22h	-230	-5	-221	-2	-5	-1	-5	-1
23h	-219	-4	-212	0	-4	-1	-4	-1
00h	-211	20	-206	20	-2	0	-2	0



**Slika 5.17.** Tokovi snage na sabirnici TS 10/0,4 kV za 1. slučaj sunčanog dana



**Slika 5.18.** Tokovi snage na sabirnici Vod – komercijalne zgrade za 1. slučaj sunčanog dana

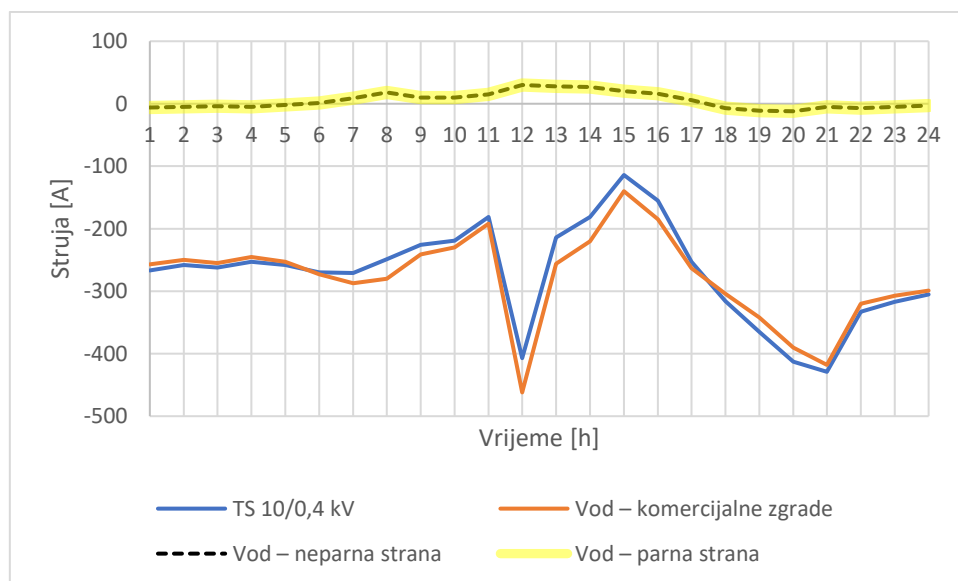


**Slika 5.19.** Tokovi snage na sabirnici Vod – parna i neparna strana za 1. slučaj sunčanog dana

**Tablica 5.8.** Strujna opterećenja za 1. slučaj sunčanog dana

Vrijeme u danu	TS 10/0,4 kV	Vod – komercijalne zgrade	Vod – neparna strana	Vod – parna strana
	A	A	A	A
1h	-267	-257	-6	-6
2h	-258	-250	-5	-5
3h	-262	-255	-4	-4
4h	-253	-245	-5	-5
5h	-258	-253	-2	-2

6h	-270	-273	1	1
7h	-271	-287	9	9
8h	-249	-280	18	18
9h	-226	-241	10	10
10h	-219	-230	10	10
11h	-181	-192	15	15
12h	-407	-462	30	30
13h	-214	-256	28	28
14h	-181	-220	27	27
15h	-114	-140	20	20
16h	-155	-185	16	16
17h	-253	-263	6	6
18h	-316	-304	-7	-7
19h	-365	-342	-11	-11
20h	-413	-390	-12	-12
21h	-429	-418	-5	-5
22h	-333	-320	-7	-7
23h	-317	-307	-5	-5
00h	-305	-299	-3	-3



**Slika 5.20.** Strujna opterećenja za 1. slučaj sunčanog dana

Iz provedenog mjerenja za 1. slučaj sunčanog dana koji je prikazan grafovima i tablicama iznad može se zaključiti da dolazi do manjeg pada napona u odnosu na referentni slučaj. Do manjeg pada napona dolazi zbog proizvodnje koja je instalirana na pola kućanstava i pola komercijalnih zgrada od ukupnog broja. Proizvodnja iz fotonaponskih elektrana je najveća u 12h kada je i najveća potrošnja kod komercijalnih zgrada te u tom slučaju dolazi do manjeg pada napona u odnosu na referentni slučaj. U noćnim satima na sabirnicama komercijalnih

zgrada dolazi do neznačajnog pada napona, dok na sabirnicama kućanstava nema pada napona te on iznosi 1 p.u.

Gubici radne snage tijekom cijeloga dana približno iznose 0, dok su gubici jalove snage u odnosu na referentni slučaj značajno smanjeni. Razlog tomu je proizvodnja koja dolazi od pojedinih komercijalnih zgrada i kućanstava, što dokazuje da su gubici najmanji kada se energija proizvodi na mjestu ili u okolini mjesta potrošnje.

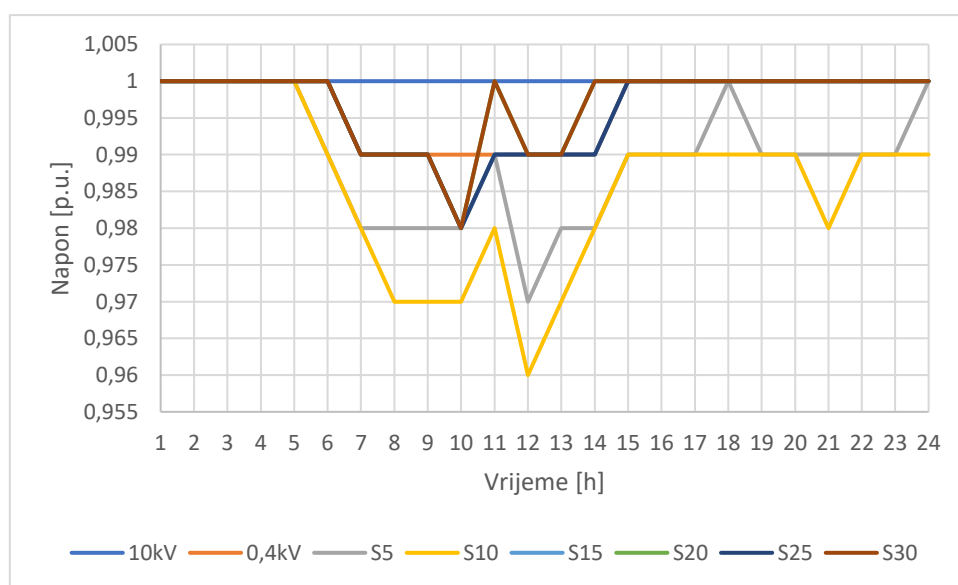
Tok radne snage na „TS 10/0,4 kV“ i „vod – komercijalne zgrade“ je tijekom cijeloga dana negativan kao i kod referentnog slučaja, ali s manjim vrijednostima snage koju povlači iz mreže. Također, razlikuju se još po tome da se radna snaga povećava u referentnom slučaju, dok se u ovom slučaju radna snaga smanjuje kako dan odmiče. Tok radne snage na „vod – parna strana“ i „vod – neparna strana“ je za vrijeme kada imamo značajnu proizvodnju iz fotonaponskih elektrana kupaca s vlastitom proizvodnjom pozitivnog predznaka što znači da predaje snagu u mrežu, dok je u ostalo vrijeme negativnog predznaka. Tijekom noćnih sati tok jalove snage na „TS 10/0,4 kV“ i „vod – komercijalne zgrade“ je pozitivan, što je posljedica kapacitivnog karaktera potrošnje komercijalnih zgrada. Kako dan odmiče i kako se povećava potreba za električnom energijom tako se povećava tok jalove snage iz mreže prema potrošačima, ali u manjem iznosu u odnosu na referentni slučaj. Na „vod – parna strana“ i „vod – neparna strana“ uglavnom je tijekom dana tok jalove snage induktivnog karaktera što predstavlja povlačenje jalove snage iz mreže. Zbog pretpostavljenog smjera kada energija ide iz mreže onda je predznak negativan.

Strujna su opterećenja na promatranim mjestima „TS 10/0,4 kV“ i „vod – komercijalne zgrade“ tijekom dana negativnog predznaka i padaju u odnosu na referentni slučaj kako se povećava proizvodnja iz FN. Do toga dolazi zbog negativnog predznaka radne snage i smanjenja toka radne snage koji ide iz mreže prema komercijalnim potrošačima. Strujna opterećenja na „vod – parna strana“ i „vod – neparna strana“ su negativnog predznaka kada nema proizvodnje iz FN, dok su za vrijeme proizvodnje iz FN pozitivnog predznaka što govori da je proizvodnja veća od potrošnje te je smjer toka snage prema mreži.

## 5.2.2. Promjenjivi dan

**Tablica 5.9.** Naponi na sabirnicama za 1. slučaj promjenjivog dana

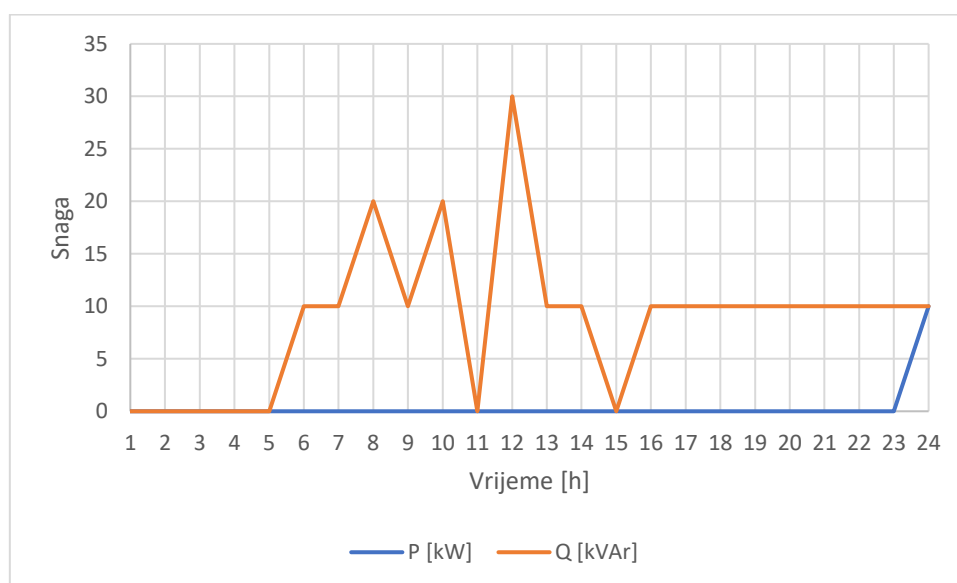
Vrijeme u danu	10kV	0,4kV	S5	S10	S15	S20	S25	S30
	p.u.	p.u.	p.u.	p.u.	p.u.	p.u.	p.u.	p.u.
1h	1	1	1	1	1	1	1	1
2h	1	1	1	1	1	1	1	1
3h	1	1	1	1	1	1	1	1
4h	1	1	1	1	1	1	1	1
5h	1	1	1	1	1	1	1	1
6h	1	1	0,99	0,99	1	1	1	1
7h	1	0,99	0,98	0,98	0,99	0,99	0,99	0,99
8h	1	0,99	0,98	0,97	0,99	0,99	0,99	0,99
9h	1	0,99	0,98	0,97	0,99	0,99	0,99	0,99
10h	1	0,99	0,98	0,97	0,98	0,98	0,98	0,98
11h	1	0,99	0,99	0,98	0,99	1	0,99	1
12h	1	0,99	0,97	0,96	0,99	0,99	0,99	0,99
13h	1	0,99	0,98	0,97	0,99	0,99	0,99	0,99
14h	1	0,99	0,98	0,98	0,99	1	0,99	1
15h	1	1	0,99	0,99	1	1	1	1
16h	1	1	0,99	0,99	1	1	1	1
17h	1	1	0,99	0,99	1	1	1	1
18h	1	1	1	0,99	1	1	1	1
19h	1	1	0,99	0,99	1	1	1	1
20h	1	1	0,99	0,99	1	1	1	1
21h	1	1	0,99	0,98	1	1	1	1
22h	1	1	0,99	0,99	1	1	1	1
23h	1	1	0,99	0,99	1	1	1	1
00h	1	1	1	0,99	1	1	1	1



**Slika 5.21.** Naponi na sabirnicama za 1. slučaj promjenjivog dana

**Tablica 5.10.** Ukupni gubici za 1. slučaj promjenjivog dana

Vrijeme u danu	P [kW]	Q [kVAr]
1h	0	0
2h	0	0
3h	0	0
4h	0	0
5h	0	0
6h	0	10
7h	0	10
8h	0	20
9h	0	10
10h	0	20
11h	0	0
12h	0	30
13h	0	10
14h	0	10
15h	0	0
16h	0	10
17h	0	10
18h	0	10
19h	0	10
20h	0	10
21h	0	10
22h	0	10
23h	0	10
00h	10	10

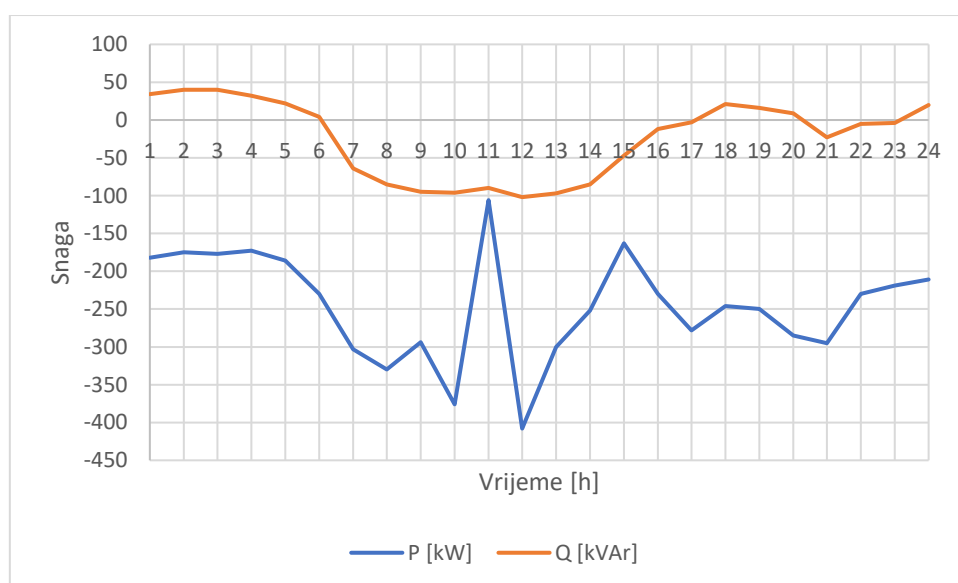


**Slika 5.22.** Ukupni gubici za 1. slučaj promjenjivog dana

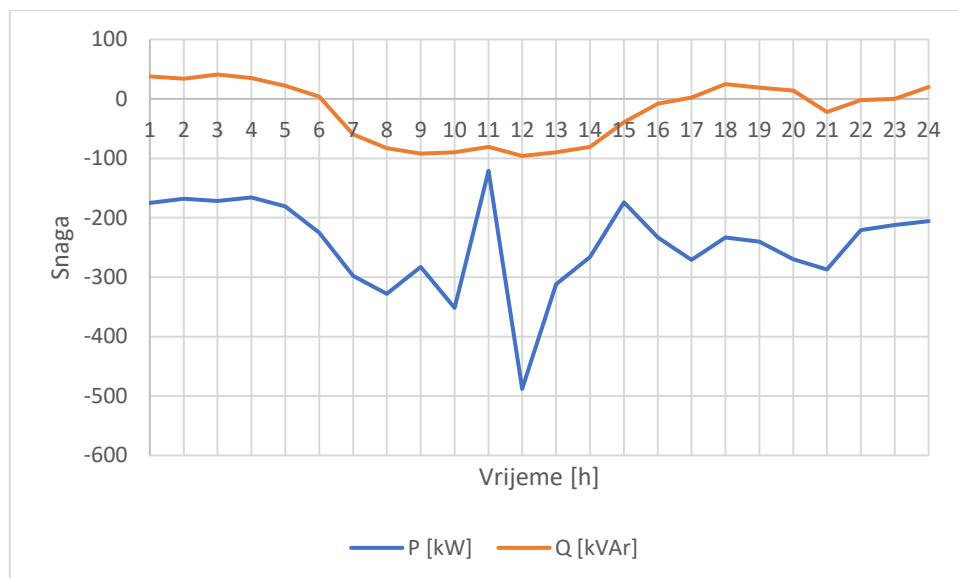


**Tablica 5.11.** Tokovi snage za 1. slučaj promjenjivog dana

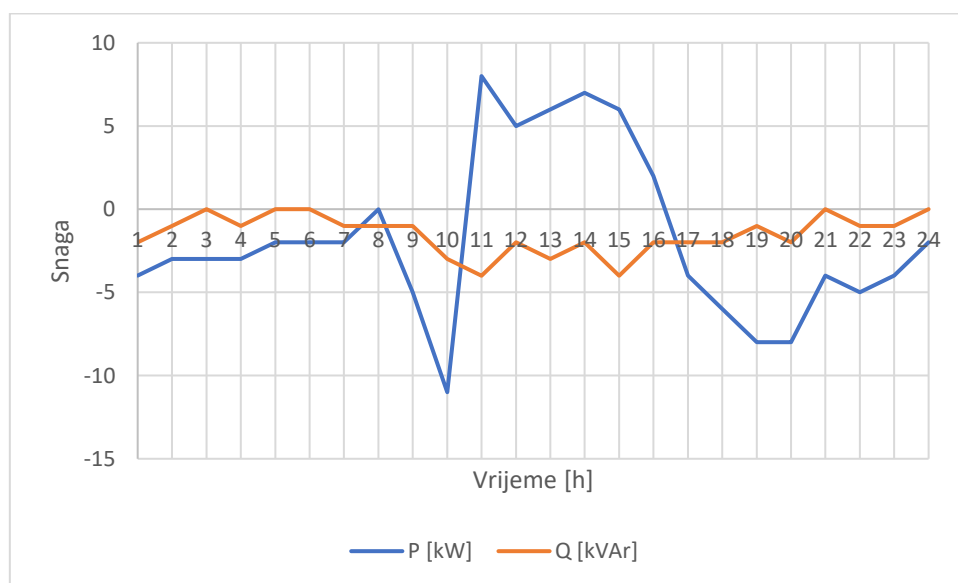
Vrijeme u danu	TS 10/0,4 kV		Vod – komercijalne zgrade		Vod – neparna strana		Vod – parna strana	
	P	Q	P	Q	P	Q	P	Q
	kW	kVAr	kW	kVAr	kW	kVAr	kW	kVAr
1h	-182	34	-175	38	-4	-2	-4	-2
2h	-175	40	-168	34	-3	-1	-3	-1
3h	-177	40	-172	41	-3	0	-3	0
4h	-173	32	-166	35	-3	-1	-3	-1
5h	-186	22	-181	22	-2	0	-2	0
6h	-230	4	-225	4	-2	0	-2	0
7h	-303	-64	-298	-60	-2	-1	-2	-1
8h	-330	-85	-328	-83	0	-1	0	-1
9h	-294	-95	-283	-92	-5	-1	-5	-1
10h	-376	-96	-352	-90	-11	-3	-11	-3
11h	-106	-90	-121	-81	8	-4	8	-4
12h	-408	-102	-488	-96	5	-2	5	-2
13h	-300	-97	-312	-90	6	-3	6	-3
14h	-252	-85	-266	-81	7	-2	7	-2
15h	-163	-47	-174	-39	6	-4	6	-4
16h	-230	-12	-233	-8	2	-2	2	-2
17h	-278	-3	-271	2	-4	-2	-4	-2
18h	-246	21	-233	25	-6	-2	-6	-2
19h	-250	16	-240	19	-8	-1	-8	-1
20h	-285	9	-270	14	-8	-2	-8	-2
21h	-295	-23	-287	-22	-4	0	-4	0
22h	-230	-5	-221	-2	-5	-1	-5	-1
23h	-219	-4	-212	0	-4	-1	-4	-1
00h	-211	20	-206	20	-2	0	-2	0



**Slika 5.23.** Tokovi snage na sabirnici TS 10/0,4 kV za 1. slučaj promjenjivog dana



**Slika 5.24.** Tokovi snage na sabirnici Vod – komercijalne zgrade za 1. slučaj promjenjivog dana

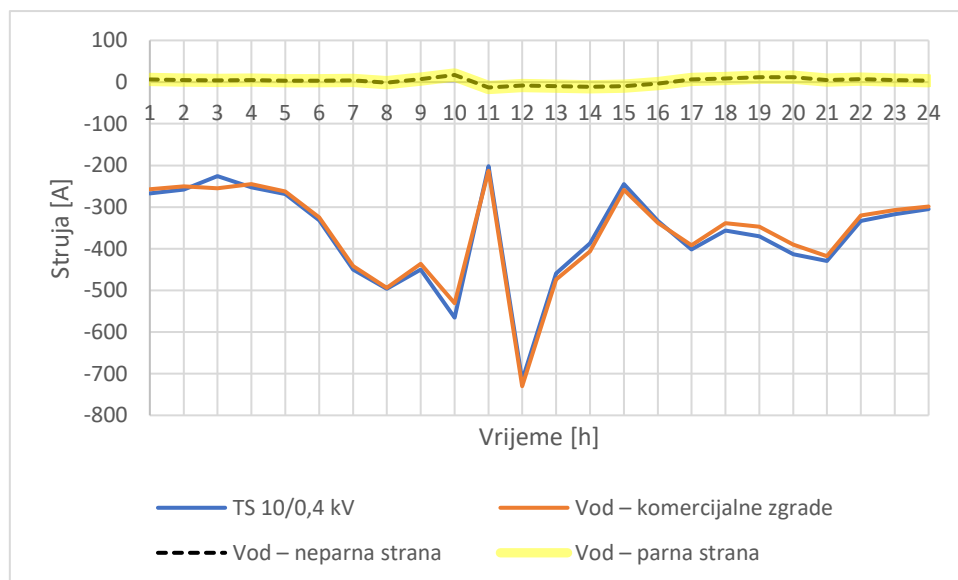


**Slika 5.25.** Tokovi snage na sabirnici Vod – parna i neparna strana za 1. slučaj promjenjivog dana

**Tablica 5.12.** Strujna opterećenja za 1. slučaj promjenjivog dana

Vrijeme u danu	TS 10/0,4 kV	Vod – komercijalne zgrade	Vod – neparna strana	Vod – parna strana
	A	A	A	A
1h	-267	-257	6	6
2h	-258	-250	5	5
3h	-226	-255	4	4

4h	-253	-245	5	5
5h	-269	-263	3	3
6h	-332	-325	3	3
7h	-450	-442	4	4
8h	-496	-494	-1	-1
9h	-450	-436	7	7
10h	-565	-531	17	17
11h	-202	-213	-13	-13
12h	-716	-730	-8	-8
13h	-459	-474	-10	-10
14h	-387	-406	-11	-11
15h	-245	-259	-10	-10
16h	-333	-338	-4	-4
17h	-402	-392	6	6
18h	-356	-339	9	9
19h	-370	-347	12	12
20h	-413	-390	12	12
21h	-429	-418	5	5
22h	-333	-320	7	7
23h	-317	-307	5	5
00h	-305	-299	3	3



**Slika. 5.26.** Strujna opterećenja za 1. slučaj promjenjivog dana

Iz provedenog mjerenja za 1. slučaj promjenjivog dana koji je prikazan grafovima i tablicama iznad može se zaključiti da dolazi do većeg variranja napona u odnosu na referentni slučaj i sunčani dan. Također, dolazi do većeg pada napona na sabirnicama komercijalnih zgrada u odnosu na sunčani dan. To se događa zbog proizvodnje iz FN sustava koja varira tijekom dana. Proizvodnja iz FN sustava na komercijalnim zgradama je najveća u 11h, dok je najveća

potrošnja kod istih u 12h. Proizvodnja iz FN sustava na kućanstvima je najveća u 11h, dok je najveća potrošnja kod njih u 10h. Za vrijeme minimalnog tereta, u noćnim satima na sabirnicama komercijalnih zgrada dolazi do neznatnog pada napona, dok na sabirnicama kućanstava nema pada napona te on iznosi 1 p.u.

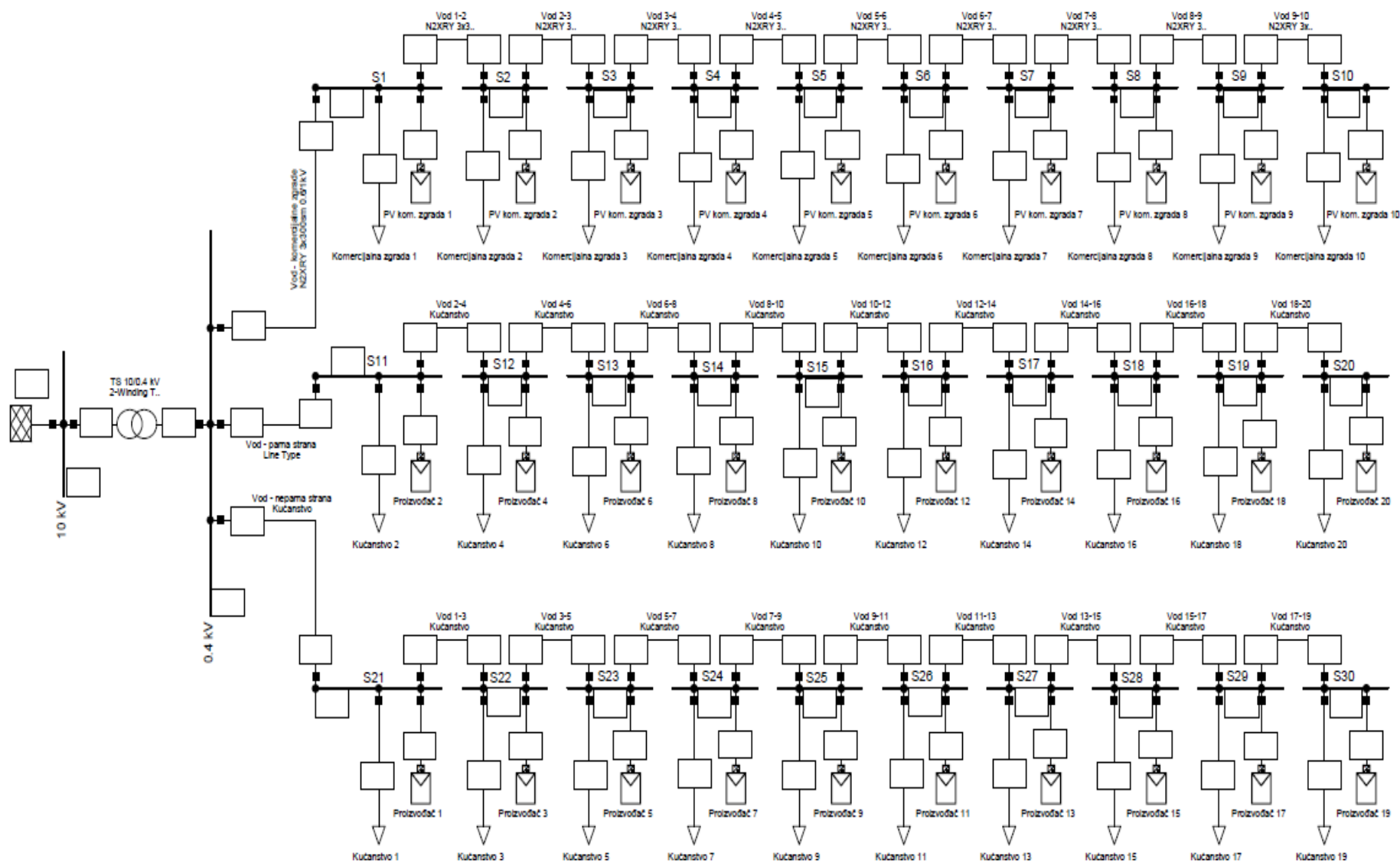
Gubici radne snage približno iznose 0, dok su gubici jalove snage u odnosu na referentni slučaj su značajno smanjeni, ali su veći u odnosu na sunčani dan.

Tok radne snage na „TS 10/0,4 kV“ i „vod – komercijalne zgrade“ je tijekom cijeloga dana negativan kao i u prethodnim slučajevima, što govori da je potrošnja veća od proizvodnje te je tok snage usmjeren iz mreže prema potrošačima. Vrijednosti te snage mijenjaju se prema potrebama potrošača za električnom energijom u odnosu na proizvodnju pojedinih potrošača. Tok radne snage na „vod – parna strana“ i „vod – neparna strana“ je negativnog predznaka sve dok ne dođe do maksimalne proizvodnje u 11h kada prelazi u pozitivan predznak i takvog je predznaka do 17h kada ponovno prelazi u negativan predznak. U odnosu na sunčani dan kod promjenjivog dana je veća potreba za jalovom snagom koja se povlači iz mreže. Tijekom minimalnog tereta za vrijeme noćnih sati tok jalove snage na „TS 10/0,4 kV“ i „vod – komercijalne zgrade“ je pozitivan, što je posljedica kapacitivnog karaktera potrošnje komercijalnih zgrada. Zbog pretpostavljenog smjera kada energija ide u mrežu, tada je predznak pozitivan. Kako dan odmiče i kako se povećava potreba za električnom energijom tako se povećava tok jalove snage iz mreže prema potrošačima, ali u većem iznosu u odnosu na slučaj sunčani dan. Na „vod – parna strana“ i „vod – neparna strana“ uglavnom je tijekom dana tok jalove snage induktivnog karaktera što predstavlja povlačenje jalove energije iz mreže.

Strujna su opterećenja na promatranim mjestima „TS 10/0,4 kV“ i „vod – komercijalne zgrade“ tijekom dana negativnog predznaka i mijenjaju se prema potrebama potrošača za električnom energijom u odnosu na proizvodnju pojedinih potrošača. Razlog tomu je negativan predznak radne snage i mijenjanje toka radne snage koji ide iz mreže prema komercijalnim potrošačima. Strujna opterećenja na „vod – parna strana“ i „vod – neparna strana“ su negativnog predznaka kada nema proizvodnje iz FN sustava, dok za vrijeme proizvodnje iz FN sustava ona su pozitivnog predznaka što govori da je tada proizvodnja veća od potrošnje kod priključenih kućanstava te je smjer toka snage prema mreži.

### **5.3. Distributivna mreža – 2. slučaj**

U ovom slučaju mreža se sastoji od 20 kupaca s vlastitom proizvodnjom kao obiteljske kuće te 10 kupaca s vlastitom proizvodnjom kao komercijalne zgrade. Svi kupci predstavljaju kupce s vlastitom proizvodnjom.

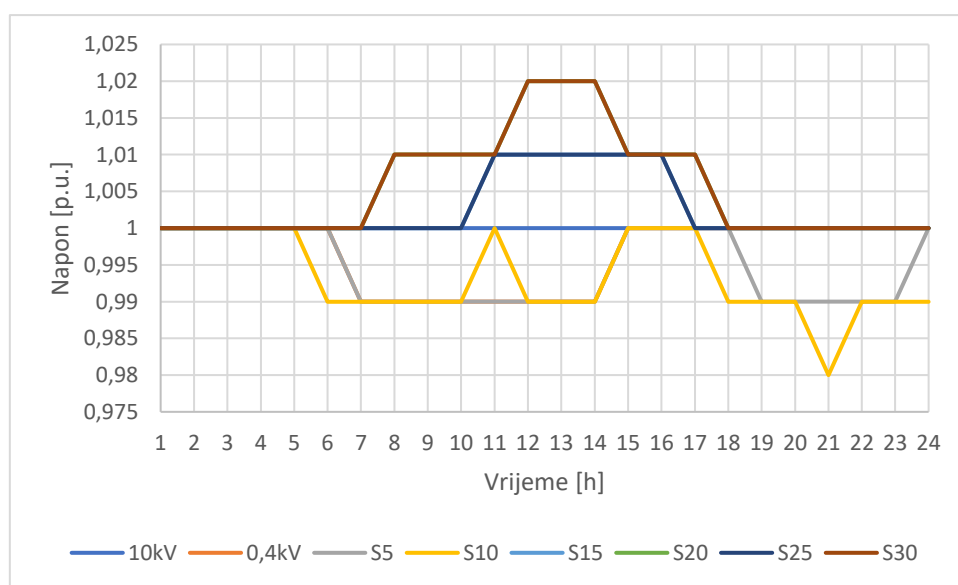


Slika 5.27. Jednopolna shema distribucijskog sustva za 2. slučaj

### 5.3.1. Sunčani dan

**Tablica 5.13.** *Naponi na sabirnicama za 2. slučaj sunčanog dana*

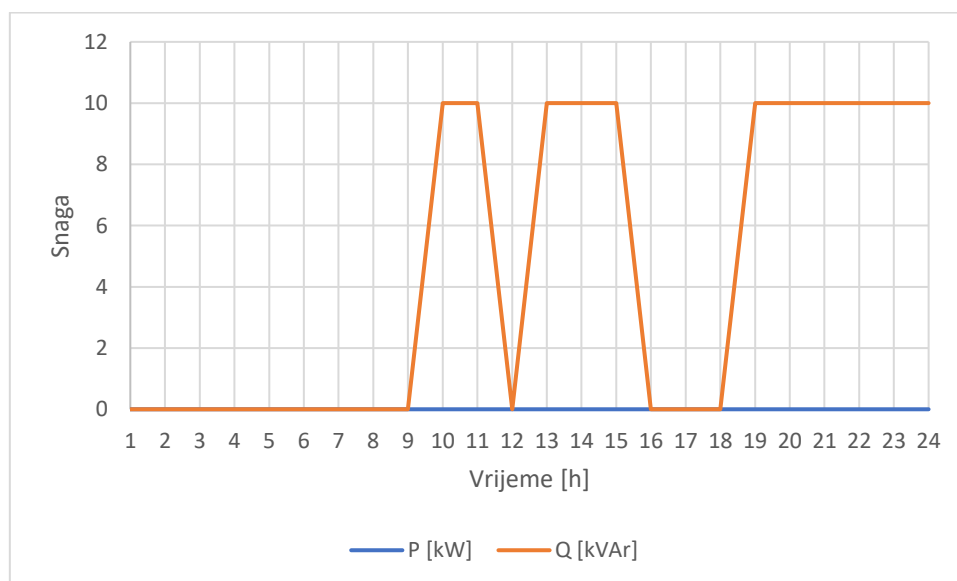
Vrijeme u danu	10kV	0,4kV	S5	S10	S15	S20	S25	S30
	p.u.	p.u.	p.u.	p.u.	p.u.	p.u.	p.u.	p.u.
1h	1	1	1	1	1	1	1	1
2h	1	1	1	1	1	1	1	1
3h	1	1	1	1	1	1	1	1
4h	1	1	1	1	1	1	1	1
5h	1	1	1	1	1	1	1	1
6h	1	1	1	0,99	1	1	1	1
7h	1	0,99	0,99	0,99	1	1	1	1
8h	1	0,99	0,99	0,99	1	1,01	1	1,01
9h	1	0,99	0,99	0,99	1	1,01	1	1,01
10h	1	0,99	0,99	0,99	1	1,01	1	1,01
11h	1	0,99	0,99	1	1,01	1,01	1,01	1,01
12h	1	0,99	0,99	0,99	1,01	1,02	1,01	1,02
13h	1	0,99	0,99	0,99	1,01	1,02	1,01	1,02
14h	1	0,99	0,99	0,99	1,01	1,02	1,01	1,02
15h	1	1	1	1	1,01	1,01	1,01	1,01
16h	1	1	1	1	1,01	1,01	1,01	1,01
17h	1	1	1	1	1	1,01	1	1,01
18h	1	1	1	0,99	1	1	1	1
19h	1	1	0,99	0,99	1	1	1	1
20h	1	1	0,99	0,99	1	1	1	1
21h	1	1	0,99	0,98	1	1	1	1
22h	1	1	0,99	0,99	1	1	1	1
23h	1	1	0,99	0,99	1	1	1	1
00h	1	1	1	0,99	1	1	1	1



**Slika 5.28.** *Naponi na sabirnicama za 2. slučaj sunčanog dana*

**Tablica 5.14.** *Ukupni gubici za 2. slučaj sunčanog dana*

Vrijeme u danu	P [kW]	Q [kVAr]
1h	0	0
2h	0	0
3h	0	0
4h	0	0
5h	0	0
6h	0	0
7h	0	0
8h	0	0
9h	0	0
10h	0	10
11h	0	10
12h	0	0
13h	0	10
14h	0	10
15h	0	10
16h	0	0
17h	0	0
18h	0	0
19h	0	10
20h	0	10
21h	0	10
22h	0	10
23h	0	10
00h	0	10

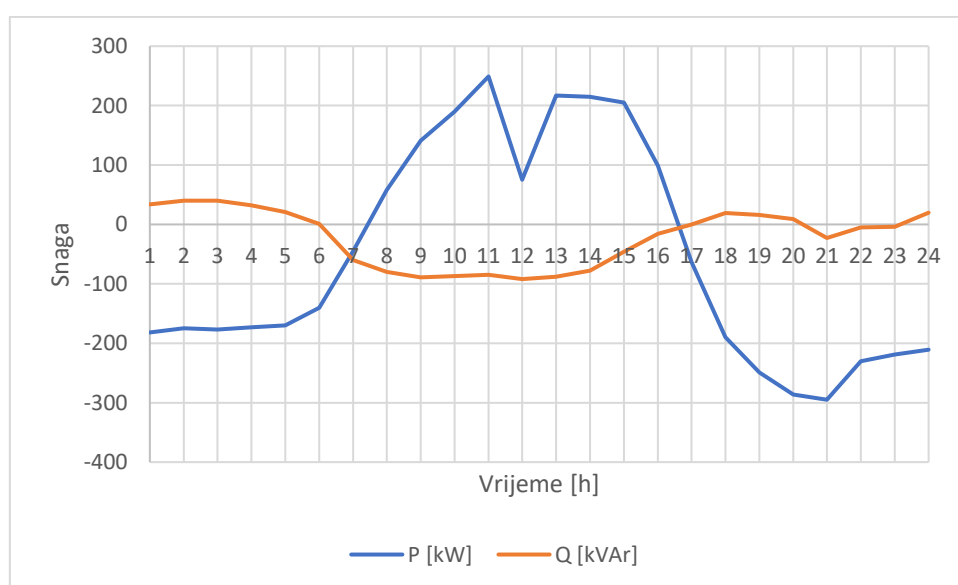


**Slika 5.29.** *Ukupni gubici za 2. slučaj sunčanog dana*

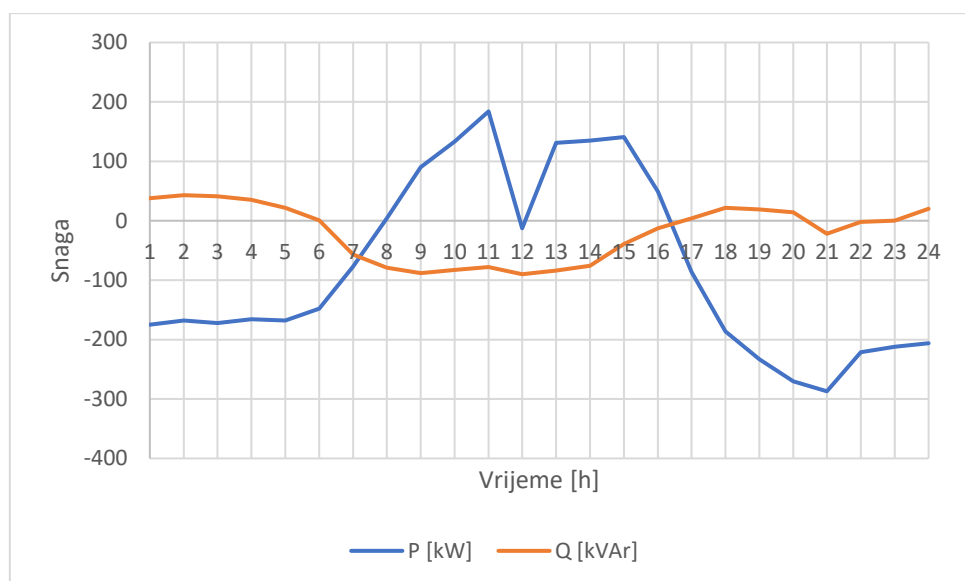


**Tablica 5.15.** Tokovi snage za 2. slučaj sunčanog dana

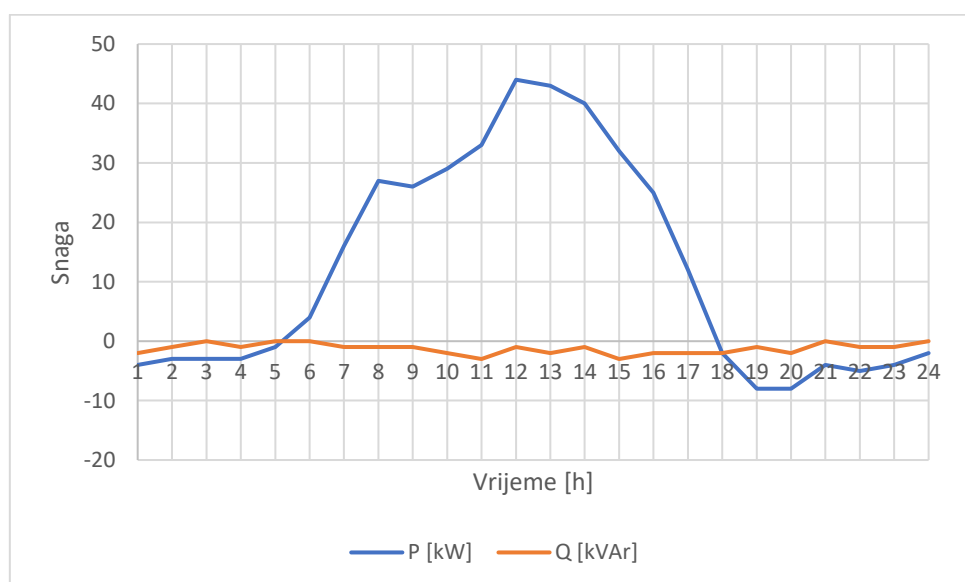
Vrijeme u danu	TS 10/0,4 kV		Vod – komercijalne zgrade		Vod – neparna strana		Vod – parna strana	
	P	Q	P	Q	P	Q	P	Q
	kW	kVAr	kW	kVAr	kW	kVAr	kW	kVAr
1h	-182	34	-175	38	-4	-2	-4	-2
2h	-175	40	-168	43	-3	-1	-3	-1
3h	-177	40	-172	41	-3	0	-3	0
4h	-173	32	-166	35	-3	-1	-3	-1
5h	-170	21	-168	22	-1	0	-1	0
6h	-140	1	-148	1	4	0	4	0
7h	-45	-60	-77	-57	16	-1	16	-1
8h	58	-80	4	-79	27	-1	27	-1
9h	141	-89	90	-88	26	-1	26	-1
10h	190	-87	133	-83	29	-2	29	-2
11h	249	-85	184	-78	33	-3	33	-3
12h	75	-92	-13	-90	44	-1	44	-1
13h	217	-88	131	-84	43	-2	43	-2
14h	215	-78	135	-76	40	-1	40	-1
15h	205	-46	141	-39	32	-3	32	-3
16h	99	-16	49	-13	25	-2	25	-2
17h	-63	0	-86	4	12	-2	12	-2
18h	-190	19	-186	22	-2	-2	-2	-2
19h	-249	16	-233	19	-8	-1	-8	-1
20h	-286	9	-270	14	-8	-2	-8	-2
21h	-295	-23	-287	-22	-4	0	-4	0
22h	-230	-5	-221	-2	-5	-1	-5	-1
23h	-219	-4	-212	0	-4	-1	-4	-1
00h	-211	20	-206	20	-2	0	-2	0



**Slika 5.30.** Tokovi snage na sabirnici TS 10/0,4 kV za 2. slučaj sunčanog dana



**Slika 5.31.** Tokovi snage na sabirnici Vod – komercijalne zgrade za 2. slučaj sunčanog dana

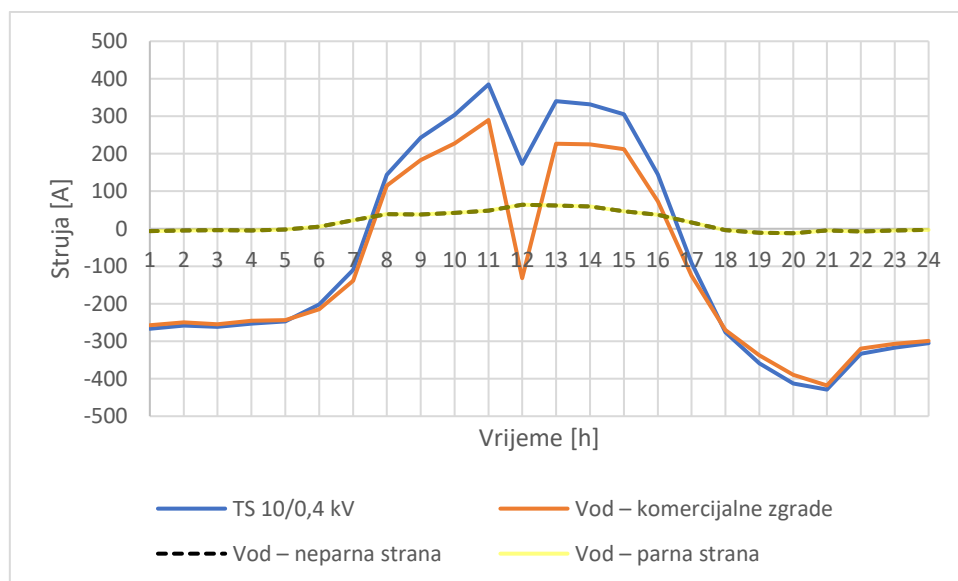


**Slika 5.32.** Tokovi snage na sabirnici Vod – parna i neparna strana za 2. slučaj sunčanog dana

**Tablica 5.16.** Strujna opterećenja za 2. slučaj sunčanog dana

Vrijeme u danu	TS 10/0,4 kV	Vod – komercijalne zgrade	Vod – neparna strana	Vod – parna strana
	A	A	A	A
1h	-267	-257	-6	-6
2h	-258	-250	-5	-5
3h	-262	-255	-4	-4
4h	-253	-245	-5	-5

5h	-247	-244	-2	-2
6h	-202	-215	6	6
7h	-110	-139	23	23
8h	144	115	39	39
9h	243	183	38	38
10h	304	228	42	42
11h	385	290	48	48
12h	173	-132	64	64
13h	340	227	62	62
14h	332	225	59	59
15h	305	212	47	47
16h	145	73	37	37
17h	-91	-125	17	17
18h	-276	-270	-4	-4
19h	-359	-338	-11	-11
20h	-413	-390	-12	-12
21h	-429	-418	-5	-5
22h	-333	-320	-7	-7
23h	-317	-307	-5	-5
00h	-305	-299	-3	-3



**Slika 5.33.** Strujna opterećenja za 2. slučaj sunčanog dana

Iz provedenog mjerenja za 2. slučaj sunčanog dana koji je prikazan grafovima i tablicama iznad može se zaključiti da na sabirnicama kućanstava čak dolazi do povećanja napona u odnosu na nazivni napon za vrijeme proizvodnje iz FN sustava. To se događa zbog toga što je proizvodnje iz FN sustava koja se nalazi kod svih kupaca veća od potrošnje. Napon na sabirnicama komercijalnih zgrada tijekom noćnih sati je 1 p.u., dok za vrijeme dana iznosi

0.99 p.u. što govori da su veliki potrošači spojeni na taj dio mreže te ni njihova proizvodnja iz FN ne može pokriti potrebe za električnom energijom što uzrokuje povlačenje energije iz mreže.

Ukupni gubici radne snage tijekom cijeloga dana približno iznose 0 kW, dok su gubici jalove snage u odnosu na referentni slučaj značajno smanjeni, ali u odnosu na 1. slučaj sunčanog dan su veći.

Tok radne snage na „TS 10/0,4 kV“, „vod – komercijalne zgrade“, „vod – parna strana“ i „vod – neparna strana“ je u vrijeme noćnih sati kada nema proizvodnje iz FN sustava negativan kao i u prethodnim slučajevima, a tada se energija povlači iz mreže, dok je tijekom dana za vrijeme proizvodnje pozitivnog predznaka. Tada ima viška proizvedene radne snage te ona ide u smjeru od proizvođača prema mreži. Tijekom minimalnog tereta za vrijeme noćnih sati tok jalove snage na „TS 10/0,4 kV“ i „vod – komercijalne zgrade“ je pozitivan, što je posljedica kapacitivnog karaktera potrošnje komercijalnih zgrada. Kako dan odmiče i kako se povećava opterećenje kod potrošača, tok jalove snage postaje induktivnog karaktera i ide iz smjera mreže prema komercijalnim zgradama. Na „vod – parna strana“ i „vod – neparna strana“ uglavnom je tijekom cijelog dana tok jalove snage induktivnog karaktera što predstavlja povlačenje jalove energije iz mreže. To se događa zbog toga što u komercijalnim zgradama i kućanstvima postoje potrošači koji troše jalovu energiju, a s obzirom da FN sustavi rade s faktorom snage 1, proizvodnje jalove snage nema te je potrebno povući jalovu energiju iz mreže.

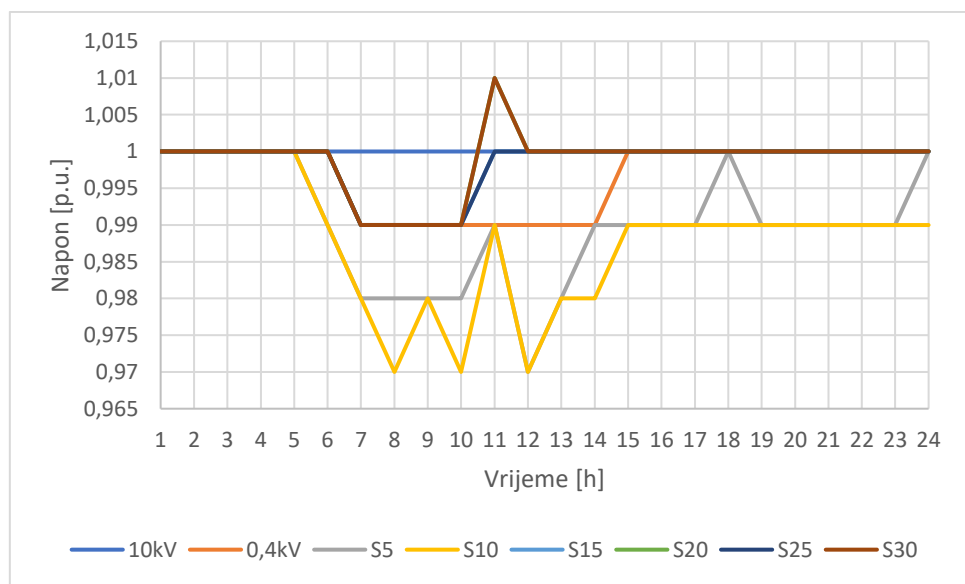
Strujna opterećenja prate tok snage, prema tome na promatranim mjestima „TS 10/0,4 kV“, „vod – komercijalne zgrade“, „vod – parna strana“ i „vod – neparna strana“ tijekom noćnih sati su negativnog predznaka, a zatim s dolaskom Sunca i povećanjem proizvodnje iz FN sustava prelaze u pozitivni predznak što predstavlja davanje energije u mrežu.

### 5.3.2. Promjenjivi dan

**Tablica 5.17.** *Naponi na sabirnicama za 2. slučaj promjenjivog dana*

Vrijeme u danu	10kV p.u.	0,4kV p.u.	S5 p.u.	S10 p.u.	S15 p.u.	S20 p.u.	S25 p.u.	S30 p.u.
1h	1	1	1	1	1	1	1	1
2h	1	1	1	1	1	1	1	1
3h	1	1	1	1	1	1	1	1
4h	1	1	1	1	1	1	1	1

5h	1	1	1	1	1	1	1	1
6h	1	1	0,99	0,99	1	1	1	1
7h	1	0,99	0,98	0,98	0,99	0,99	0,99	0,99
8h	1	0,99	0,98	0,97	0,99	0,99	0,99	0,99
9h	1	0,99	0,98	0,98	0,99	0,99	0,99	0,99
10h	1	0,99	0,98	0,97	0,99	0,99	0,99	0,99
11h	1	0,99	0,99	0,99	1	1,01	1	1,01
12h	1	0,99	0,97	0,97	1	1	1	1
13h	1	0,99	0,98	0,98	1	1	1	1
14h	1	0,99	0,99	0,98	1	1	1	1
15h	1	1	0,99	0,99	1	1	1	1
16h	1	1	0,99	0,99	1	1	1	1
17h	1	1	0,99	0,99	1	1	1	1
18h	1	1	1	0,99	1	1	1	1
19h	1	1	0,99	0,99	1	1	1	1
20h	1	1	0,99	0,99	1	1	1	1
21h	1	1	0,99	0,99	1	1	1	1
22h	1	1	0,99	0,99	1	1	1	1
23h	1	1	0,99	0,99	1	1	1	1
00h	1	1	1	0,99	1	1	1	1

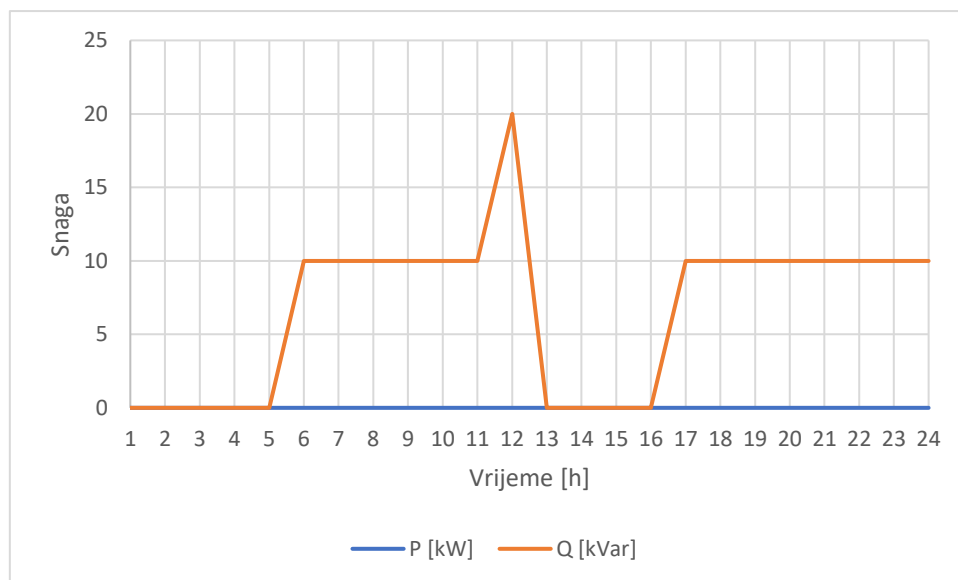


**Slika 5.34.** Naponi na sabirnicama za 2. slučaj promjenjivog dana

**Tablica 5.18.** Ukupni gubici za 2. slučaj promjenjivog dana

Vrijeme u danu	P [kW]	Q [kVAr]
1h	0	0
2h	0	0
3h	0	0

4h	0	0
5h	0	0
6h	0	10
7h	0	10
8h	0	10
9h	0	10
10h	0	10
11h	0	10
12h	0	20
13h	0	0
14h	0	0
15h	0	0
16h	0	0
17h	0	10
18h	0	10
19h	0	10
20h	0	10
21h	0	10
22h	0	10
23h	0	10
00h	0	10

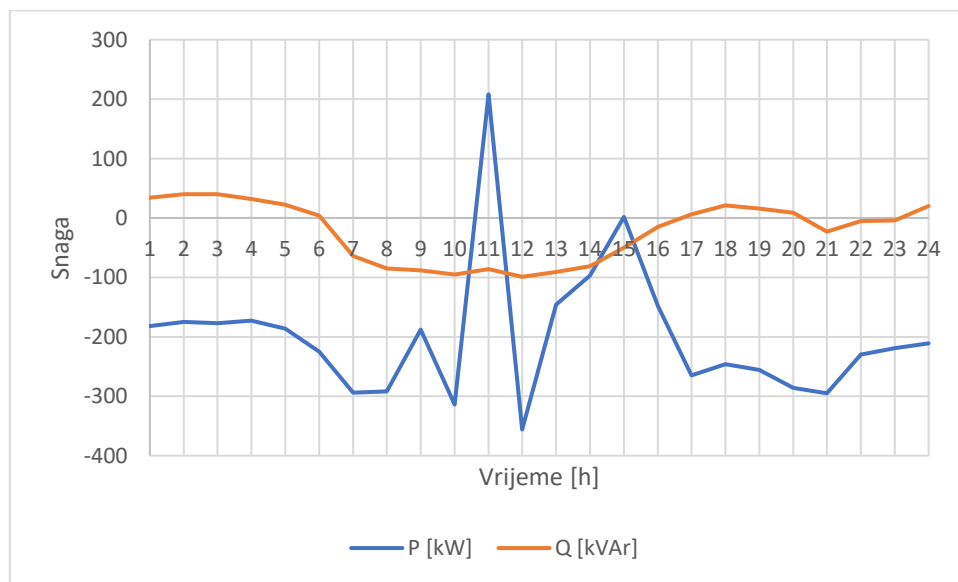


**Slika 5.35.** Ukupni gubici za 2. slučaj promjenjivog dana

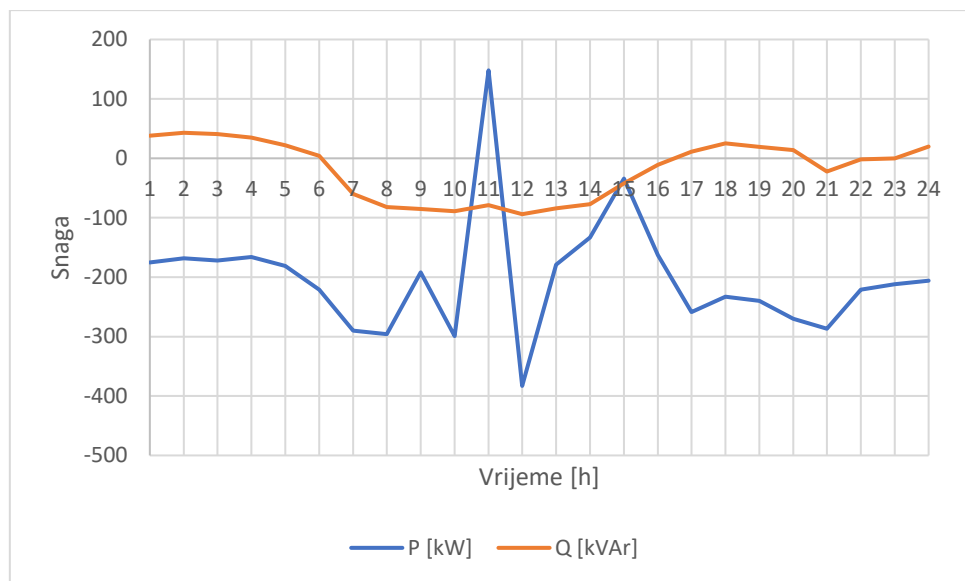
**Tablica 5.19.** Tokovi snage za 2. slučaj promjenjivog dana

Vrijeme u danu	TS 10/0,4 kV		Vod – komercijalne zgrade		Vod – neparna strana		Vod – parna strana	
	P	Q	P	Q	P	Q	P	Q
	kW	kVAr	kW	kVAr	kW	kVAr	kW	kVAr
1h	-182	34	-175	38	-4	-2	-4	-2

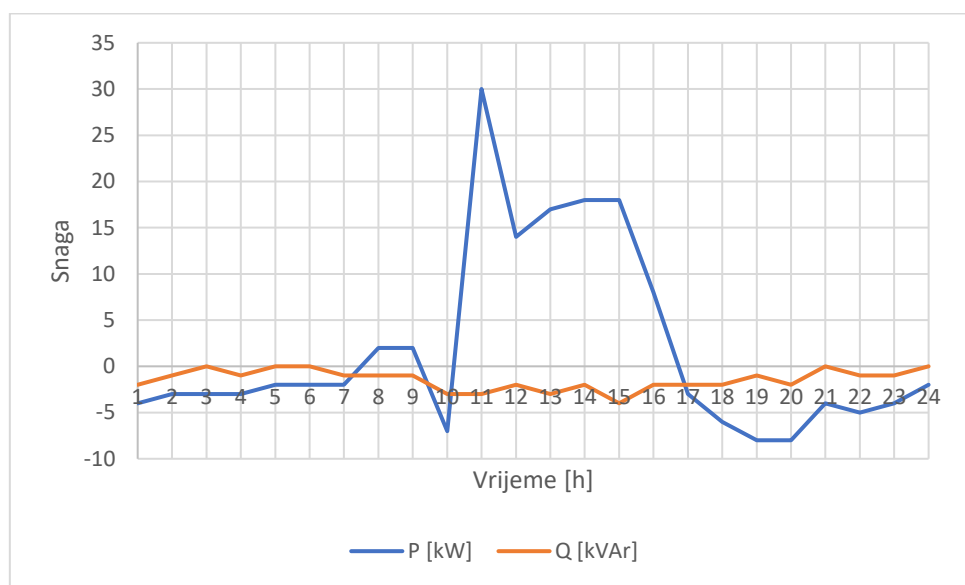
2h	-175	40	-168	43	-3	-1	-3	-1
3h	-177	40	-172	41	-3	0	-3	0
4h	-173	32	-166	35	-3	-1	-3	-1
5h	-186	22	-181	22	-2	0	-2	0
6h	-225	4	-221	4	-2	0	-2	0
7h	-294	-64	-290	-60	-2	-1	-2	-1
8h	-292	-85	-296	-82	2	-1	2	-1
9h	-188	-88	-192	-85	2	-1	2	-1
10h	-314	-95	-299	-89	-7	-3	-7	-3
11h	208	-86	148	-79	30	-3	30	-3
12h	-356	-99	-383	-94	14	-2	14	-2
13h	-146	-91	-179	-84	17	-3	17	-3
14h	-97	-81	-133	-77	18	-2	18	-2
15h	2	-50	-34	-42	18	-4	18	-4
16h	-148	-15	-163	-11	8	-2	8	-2
17h	-265	6	-259	11	-3	-2	-3	-2
18h	-246	21	-233	25	-6	-2	-6	-2
19h	-256	16	-240	19	-8	-1	-8	-1
20h	-286	9	-270	14	-8	-2	-8	-2
21h	-295	-23	-287	-22	-4	0	-4	0
22h	-230	-5	-221	-2	-5	-1	-5	-1
23h	-219	-4	-212	0	-4	-1	-4	-1
00h	-211	20	-206	20	-2	0	-2	0



**Slika 5.36.** Tokovi snage na sabirnici TS 10/0,4 kV za 2. slučaj promjenjivog dana



**Slika 5.37.** Tokovi snage na sabirnici Vod – komercijalne zgrade za 2. slučaj promjenjivog dana



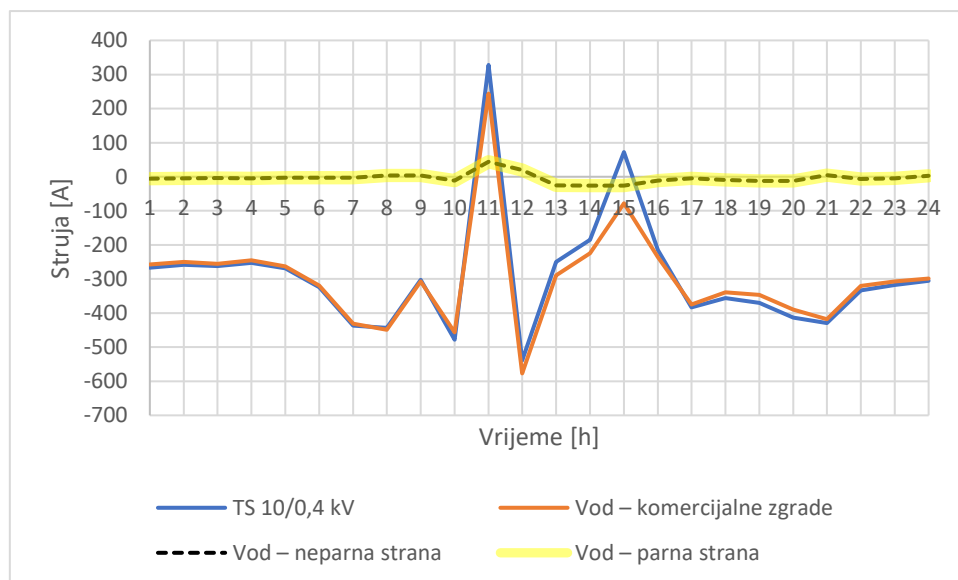
**Slika 5.38.** Tokovi snage na sabirnici Vod – parna i neparna strana za 2. slučaj promjenjivog dana

**Tablica 5.20.** Strujna opterećenja za 2. slučaj promjenjivog dana

Vrijeme u danu	TS 10/0,4 kV	Vod – komercijalne zgrade	Vod – neparna strana	Vod – parna strana
	A	A	A	A
1h	-267	-257	-6	-6
2h	-258	-250	-5	-5
3h	-262	-255	-4	-4



4h	-253	-245	-5	-5
5h	-269	-263	-3	-3
6h	-324	-319	-3	-3
7h	-437	-431	-3	-3
8h	-443	-449	4	4
9h	-302	-307	4	4
10h	-478	-456	-11	-11
11h	328	244	44	44
12h	-539	-577	20	20
13h	-250	-289	-25	-25
14h	-185	-224	-26	-26
15h	72	-78	-26	-26
16h	-215	-236	-11	-11
17h	-383	-375	-5	-5
18h	-356	-339	-9	-9
19h	-370	-347	-12	-12
20h	-413	-390	-12	-12
21h	-429	-418	5	5
22h	-333	-320	-7	-7
23h	-317	-307	-5	-5
00h	-305	-299	3	3



**Slika 5.39.** Strujna opterećenja za 2. slučaj promjenjivog dana

Iz provedenog mjerenja za 2. slučaj promjenjivog dana koji je prikazan grafovima i tablicama iznad može se zaključiti da na sabirnicama komercijalnih zgrada dolazi do većih padova napona u odnosu na slučaj sunčani dan za vrijeme vršnog opterećenja, zbog toga što tada proizvodnja iz FN sustava nije dovoljna da bi zadovoljila potrebe potrošača.

Ukupni gubici radne snage tijekom cijeloga dana približno iznose 0 kW, dok su gubici jalove snage u odnosu na referentni slučaj značajno smanjeni, ali u odnosu na 1. slučaj promjenjivog dana su manji.

Tok radne snage na „TS 10/0,4 kV“ i „vod – komercijalne zgrade“ je gotovo tijekom cijelog dana negativnog predznaka, osim u dva slučaja. Prvi je u 11h kada je najveća proizvodnja električne energije iz FN sustava, a drugi slučaj je u 15h kada je druga najveća proizvodnja. U ta dva slučaja se električna energija predaje u mrežu, dok se u ostalim slučajevim električna energija povlači iz mreže. Tok radne snage na „vod – parna strana“ i „vod – neparna strana“ varira tijekom dana te u vrijeme kada ima bilo kakve proizvodnje iz FN sustava koja uspijeva pokriti vlastitu potrošnju i višak energije predavati u mrežu. Razlika između promjenjivog i sunčanog dana je ta da se kod promjenjivog dana jako malo radne snage predaje u mreže. Razlika između 1. slučaja promjenjivog dana i 2. slučaja promjenjivog dana je manje povlačenje energije iz mreže i veće predavanje energije u mrežu kada ima proizvodnje iz FN sustava. Tijekom minimalnog tereta za vrijeme noćnih sati tok jalove snage na „TS 10/0,4 kV“ i „vod – komercijalne zgrade“ je pozitivan što je posljedica kapacitivnog karaktera potrošnje komercijalnih zgrada. Kako dan odmiče i kako se povećava opterećenje kod potrošača, tok jalove snage postaje induktivnog karaktera, iz smjera mreže prema komercijalnim zgradama. Na „vod – parna strana“ i „vod – neparna strana“ uglavnom je tijekom cijelog dana tok jalove snage induktivnog karaktera što predstavlja povlačenje jalove energije iz mreže.

Strujna opterećenja ovise o toku snage, a njihov predznak ovisi o predznaku radne snage na promatranim mjestima. Prema tome na promatranom mjestu „TS 10/0,4 kV“ i „vod – komercijalne zgrade“ tijekom gotovo cijelog dana strujna opterećenja su negativnog predznaka, osim u vrijeme dva slučaja, pri čemu je proizvodnja iz FN sustava bila dovoljno velika. Strujna opterećenja na „vod – parna strana“ i „vod – neparna strana“ su negativnog predznaka kada nema proizvodnje iz FN sustava, dok su za vrijeme proizvodnje iz FN sustava ona pozitivnog predznaka što govori da je tada proizvodnja veća od potrošnje kod priključenih kućanstava te je smjer toka snage prema mreži.

## 6. ZAKLJUČAK

Zbog sve većih potreba za električnom energijom te smanjivanja udjela konvencionalnih izvora u proizvodnji električne energije, raste broj distribuiranih jedinica priključenih na elektroenergetsku mrežu koje proizvode električnu energiju iz obnovljivih izvora. Distribuirana proizvodnja električne energije postaje jedan od glavnih elemenata u stvaranju moderne energetike. U samim počecima priključivanja distribuirane proizvodnje na mrežu njihov broj je bio zanemariv u odnosu na ukupnu elektroenergetsku mrežu. Danas je taj broj puno veći, a s obzirom na energetske i klimatske pakete koje je donijela Europska unija za 2020. godinu i 2030. godinu te dugoročnu strategiju Europske unije za 2050. godinu u budućnosti se očekuje da njihov broj još više raste te tada njihov utjecaj na mrežu postanj značajan.

Proizvodnja električne energije iz distribuiranih izvora nije predvidiva, odnosno jako je promjenjiva što nije u skladu s potrebama potrošnje, ali s obzirom da je prijateljski nastrojena prema okolišu ima prednost u odnosu na temeljne tj. konvencionalne elektrane. Zbog izostanka centraliziranosti planiranja i rasporeda proizvodnje dolazi do nemogućnosti dispečerskog upravljanja iz nacionalnog dispečerskog centra unutar elektroenergetskog sustava.

Na elektroenergetski sustav više se ne može gledati kao na zatvoren sustav s prethodno definiranom proizvodnjom i tokovima snaga. Prije distribuirane proizvodnje uloga distribuirane mreže je bila da transformira i prenese električnu energiju preuzetu iz prijenosne mreže do krajnjih kupaca. Takav sustav je predstavljao jednosmjernan tok snage od viših prema nižim naponskim razinama, a mreža je tada bila pasivna. Današnjim spajanjem obnovljivih izvora na distributivnu mrežu mijenja se i klasična konfiguracija, odnosno shvaćanje, upravljanje, podjela uloga i djelovanje distributivne mreže zbog čega ona više nije pasivna već postaje aktivna.

Analiziranjem prilika u distributivnoj mreži za referentni slučaj koji se sastoji od 10 opterećenja kao komercijalne zgrade i 20 opterećenja kao kućanstva, razmotrena su početna stanja mreže. Zbog naglog povećanja opterećenja, a izostanka distribuirane proizvodnje i slabe niskonaponske i sredjenaponske 10 kV mreže, struja je napravila padove napona na uzdužnim impedancijama elemenata mreže. Najudaljeniji potrošači komercijalnih zgrada su to najviše osjetili, dok su kućanstva to manje osjetila zbog svoje male potrošnje. Budući da

rastu opterećenja potrošača za radnom i jalovom snagom, mrežni gubici se povećavaju jer gubici rastu kako raste opterećenje mreže, prema tome maksimalno opterećenje uzrokuje veće gubitke u usporedbi s minimalnim opterećenjem. Tokovi radne snage mogu biti pozitivnog i negativnog karaktera. Pozitivni karakter predstavlja predavanje snage u mrežu, dok negativni karakter predstavlja povlačenje snage iz mreže. Tokovi jalove snage mogu biti induktivnog i kapacitivnog karaktera potrošnje. Induktivni karakter predstavlja povlačenje jalove snage iz mreže, dok kapacitivni karakter predstavlja predavanje jalove snage u mrežu. U referentnom slučaju zbog jednosmjernih tokova koji dolaze od strane nadređene mreže, tok radne snage je uvijek negativnog karaktera. Tijekom dana tok jalove snage je induktivnog karaktera potrošnje. S obzirom da FN sustavi rade s faktorom snage 1, proizvodnja jalove snage iznosi 0, u svim slučajevima ovoga rada tok jalove snage tijekom dana je induktivnog karaktera potrošnje. Uz to može se zaključiti da konstantnim povećanjem opterećenja mreže, povećavaju se i tokovi snaga kroz grane. Strujna opterećenja ovise o toku snage kroz grane, prema tome ako se poveća tok snage, povećava se i struja i obrnuto. U usporedbi s prilikama na distributivnoj mreži za 1. slučaj sunčanog i promjenjivog dana kada je na mrežu spojeno 5 kupaca s vlastitom proizvodnjom kao komercijalne zgrade i 10 kupaca s vlastitom proizvodnjom kao obiteljske kuće može se zaključiti da za vrijeme sunčanog dana dolazi do manjih padova napona u odnosu na referentni slučaj. Situacija za vrijeme promjenjivog dana je lošija u odnosu na slučaj sunčani dan te krajnji potrošači to mogu osjetiti. Distribuirana proizvodnja, zbog toga što je priključena bliže potrošačima, doprinosi smanjenju gubitaka u prijenosu. Prema tome ukupni gubici se za vrijeme sunčanog dana smanjuju u odnosu na referentni slučaj, dok su gubici dosta veći za vrijeme promjenjivog dana u odnosu na sunčani dan. S obzirom na dvosmjernost tokova snaga između nadređene mreže i FN sustava, za vrijeme sunčanog dana je znatno smanjen tok radne snage, ali je i dalje negativnog predznaka. Isti slučaj je i za vrijeme promjenjivog dana, ali varira uslijed utjecaja oblaka. Prema toku radne snage, strujna opterećenja su se smanjila. U distributivnoj mreži za 2. slučaj sunčanog i promjenjivog dana kada je na mrežu spojeno 10 kupaca s vlastitom proizvodnjom kao komercijalne zgrade i 20 kupaca s vlastitom proizvodnjom kao obiteljske kuće može se zaključiti da za vrijeme sunčanog dana dolazi do neznčajnih padova napona na sabirnicama komercijalnih zgrada, dok su sabirnice na kojima su spojena kućanstva u prenaponu u odnosu na referentni slučaj. Kod promjenjivog dana je situacija i dalje lošija u odnosu na referentni slučaj, ali bolja u odnosu na 1. slučaj promjenjivog dana, zbog više instaliranih FN sustava. Ukupni gubici u mreži su veći za vrijeme sunčanog dana, a manji za vrijeme promjenjivog dana u odnosu na 1. slučaj što je rezultat veće implementacije distribuirane proizvodnje.

Tokovi radne snage su za vrijeme sunčanog i promjenjivog dana promjenjivog karaktera. S obzirom na povećanje proizvodnje iz FN sustava, potrošači zadovoljavaju svoje potrebe za energijom te višak predaju u mrežu što predstavlja pozitivan smjer toka snage. Isti slučaj je i sa strujnim opterećenjima koja prate tok radne snage te su za vrijeme dnevnog sunčanog razdoblja pozitivnog karaktera.

## POPIS LITERATURE

- [1] A. Katalinić: „Utjecaj integracije kupaca s vlastitom proizvodnjom iz OIE na prilike u distributivnoj mreži“, Osijek, 2018.
- [2] D. Šljivac: „Integracija OIE i napredne mreže“, materijali s predavanja, 2017./2018.
- [3] M. Šunić, N.Kukulj, S. Kolundžić: „Zašto distribuirana proizvodnja energije“, članak, plin - broj 3 - godina XIII - rujan 2013  
[http://www.hsap.hr/upload\\_data/editor/files/OU\\_13\\_03.pdf](http://www.hsap.hr/upload_data/editor/files/OU_13_03.pdf) (pristup: svibanj 2019.)
- [4] I. Mijić: „Utjecaj distribuirane proizvodnje iz obnovljivih izvora na kratke spojeve u mreži i podešenje zaštite“, Osijek, 2016.
- [5] N. Dizdarević, M. Majstorović, S. Žubobradić: „Distribuirana proizvodnja električne energije“, “Pregledni članak“, Zagreb, listopad 2003.  
<https://www.eihp.hr/~ndizdar/ENERGIJA03a.pdf> (pristup: svibanj 2019.)
- [6] R. Prnec: „Alokacija distribuiranih izvora električne energije u mreži ODS-a“, članak  
[file:///C:/Users/Matej/Desktop/Alokacija\\_distribuiranih\\_izvora\\_elektricne\\_energij.pdf](file:///C:/Users/Matej/Desktop/Alokacija_distribuiranih_izvora_elektricne_energij.pdf)  
(pristup: svibanj 2019.)
- [7] M. Čavilović: „Izazovi optimiranja utjecaja obnovljivih izvora na distribucijsku mrežu“, 2012.  
[https://www.ieee.hr/download/repository/Cavlovic\\_Izazovi\\_optimiranja\\_utjecaja\\_obnovljivih\\_izvora\\_na\\_distribucijsku\\_mrezu.pdf](https://www.ieee.hr/download/repository/Cavlovic_Izazovi_optimiranja_utjecaja_obnovljivih_izvora_na_distribucijsku_mrezu.pdf) (pristup: svibanj 2019.)
- [8] A. Keškić: „Utjecaj distribuirane proizvodnje iz obnovljivih izvora na strujna opterećenja i gubitke u mreži“, Osijek, 2016.
- [9] L. Jozsa, Vođenje pogona elektroenergetskog sustava, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Elektrotehnički fakultet, Osijek 2006.

- [10] M. Magoč: „Optimalni tokovi snaga u mrežama sa obnovljivim izvorima energije“, Osijek, 2017.
- [11] D. Šljivac: „Obnovljivi izvori električne energije“, materijali s predavanja, 2017./2018.
- [12] <https://www.hep.hr/ods/korisnici/kupac-s-vlastitom-proizvodnjom/29> (pristup: svibanj 2019.)
- [13] [http://www.idistributedpv.eu/wp-content/uploads/2018/10/Deliverable\\_2.1\\_v14-1.pdf](http://www.idistributedpv.eu/wp-content/uploads/2018/10/Deliverable_2.1_v14-1.pdf) (pristup: svibanj 2019.)
- [14] Hrvatski sabor: „Zakon o obnovljivim izvorima energije i visokoučinkovitoj kogeneraciji“, NN 111/2018, Prosinac 2018.

## **Sažetak**

Spajanjem distribuiranih izvora na mrežu, mreža više nije pasivna već postaje aktivna, tada dolazi do dvosmjernosti tokova snaga. Distributivnom mrežom se simulira odnos i utjecaj na mrežu napona, gubitaka, tokova snaga i struja povećanjem integracije obnovljivih izvora za sunčani i promjenjivi dan u odnosu na referentni slučaj. Tokovi radne snage mogu biti pozitivnog i negativnog predznaka, dok tok jalove snage može biti induktivnog i kapacitivnog karaktera potrošnje. Struja prati promjene toka radne snage u mreži.

Ključne riječi: struja, distributivna mreža, gubici, tok snage, napon

## **Abstract**

By merging distributive sources on the grid, the grid becomes active, it is no longer passive. Then two-way power flows. With distribution grid can be simulated the relationship and impact on the grid of voltage, losses, power flow and current with increasing the integration of renewable sources for sunny and changing day which are compared to the reference day. The flow of active power can be with positive and negative foretoken. The flow of reactive power can have inductive and capacitive consumption character. Current follows the changes of active power flow in grid.

Key words: current, distributive network, losses, power flows, voltage



## **ŽIVOTOPIS**

Matej Anđelić rođen je 20.03.1995. u Slavonskom Brodu, s prebivalištem u Osijeku. U Velikoj Kopanici je 2009. godine, završio osnovnu školu „Ivan Filipović“ te u Slavonskom Brodu, upisuje srednju Tehničku školu koju završava 2013. godine. Na stručni preddiplomski studij elektrotehnike na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku se upisuje 2013. godine. Iste godine, nakon završetka stručnog studija, 2016. godine, upisuje razlikovne obveze te nakon završetka, 2017. godine upisuje diplomski studij, smjer Energetika, studijski program Održiva energetika.

Matej Anđelić

U Osijeku, 2019.